UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

MÉMOIRE D'ÉTUDIANT

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

MODÈLES D'AFFECTATION DE RÉSEAU DE TRANSPORT COLLECTIF URBAIN: TRAITEMENT DE L'ACCÈS ET DE LA DIVERSION ENTRE LES CHEMINS

par

Joaquin De Cea Chicano

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de
Philosophiae Doctor (Ph.D.), Génie civil,
Ecole Polytechnique de Montréal.

Cette thèse a été publiée grâce à une subvention du
fonds F.C.A.C. pour l'aide et le soutien à la recherche.

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #268
Juin 1982

Dépôt légal - 4e trimestre 1982

SOMMAIRE

Cette recherche vise principalement à déterminer l'importance relative de deux sources d'erreur dans les modèles d'affectation de réseaux de transport en commun:

- les hypothèses concernant le comportement des voyageurs face au choix d'itinéraires;
- le niveau de résolution du problème (agrégation spatiale) auquel est étroitement lié le problème de la simulation de l'accès au réseau.

Elle est fondée sur une étude empirique de grande envergure, qui utilise les informations d'une enquête origine-destination de déplacements, réalisée en 1978 à Montréal par la Commission de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal.

Les principaux résultats de la comparaison des itinéraires décrits (quelques 17.000 déplacements individuels effectués pendant la période de pointe du matin) avec des itinéraires simulés, obtenus à l'aide d'un algorithme de calcul de chemins d'impédance minimale, peuvent se résumer comme suit:

- lorsque les itinéraires simulés sont calculés entre les noeuds extrémités des itinéraires décrits, le modèle peut reproduire environ 88% des cas analysés.

- lorsque le choix des noeuds d'accès intervient, le taux de reproduction des itinéraires décrits décroît considérablement. Dans ce cas il demeure inférieur à 40%.

Ces résultats permettent de conclure que:

- Les erreurs du modèle d'affectation tout-ou-rien dues aux problèmes d'agrégation spatiale et d'accès sont nettement plus importantes que celles dues aux hypothèses concernant le comportement des voyageurs face au choix de routes.

- Les modèles d'affectation de transport en commun qui semblent les plus adéquats sont ceux qui chargent le flot entre deux zones parmi plusieurs chemins alternatifs, ceux-ci étant les chemins d'impédance minimale sur le réseau entre les noeuds d'accès à l'origine et les noeuds d'accès à la destination.

Ces principes, sur lesquels se basent aussi les modèles TRANSCOM et TRANSEPT, inspirent le modèle d'affectation proposé dans ce travail, qui comporte une séquence de six modules indépendants:

- construction du réseau (STRUCT)
- détermination des noeuds d'accès des zones (ACCES)
- transformation d'une entrée non nulle de la matrice O-D en plusieurs paires O-D réseau (EXPAN)
- calcul de chemins d'impédance minimale entre noeuds (ou entre liens) du réseau (CHEMIN)

- répartition du flot entre deux zones parmi les chemins alternatifs (DIVERSION)
- chargement des flots sur le réseau (CHARGE).

Lors d'une épreuve d'applicabilité de ce modèle à des problèmes de grande taille, celui-ci a été utilisé avec succès dans l'analyse du réseau de la période de pointe de Montréal, comportant 1260 zones, 908 noeuds et 134 lignes de transport en commun.

ABSTRACT

The principal objective of this research work is to determine the comparative effects of two sources of error on the results of public transport assignment models:

- The behavior hypothesis concerning the choice of route by an individual trip maker;
- The problem resolution level (spatial aggregation) which the network access simulation problem is tightly linked to.

This research is based on an empirical study using the trip data provided by the O-D survey carried out, in 1978 in Montreal, for the Montreal Urban Community Transit Commission.

The main analytical results comparing the survey deduced passenger routes (some 17 000 A.M. peak individual trips) with the simulated ones provided by a minimum path algorithm, can be summarized as follows:

- When the first and last survey path nodes are imposed on the simulated path, the two types of paths match in 88% of the cases.
- When the access node choice is simulated by the model, only under 40% of the simulated paths match with the survey ones.

From theses results, it can be concluded that:

- The all-or-nothing assignment model errors caused by spatial aggregation and access problems are significantly larger than those due to the behavior hypothesis concerning the choice made by trip makers from a number of alternative paths.

- The Transit assignment models best fitting the reality seem to be those which load the flow between zones among a set of alternative paths, namely the minimum cost paths between origin and destination access nodes.

The proposed assignment model originates from these principles (also used as a basis by the TRANSCOM and TRANSEPT models) and is composed of a sequence of six independent modules:

- Building of the network (STRUCT)
- Determination of the zone access nodes (ACCES)
- Transformation of a non-zero O-D matrix element into several O-D network pairs (EXPAN)
- Computation of the minimum cost path between public transport nodes or links (CHEMIN)
- Splitting of the flow between two zones into alternative paths (DIVERSION)
- Loading of the flows on the network (CHARGE).

In a test of its capability to handle large problems, the model was successfully applied to the peak period Montreal transit network.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur le professeur Robert Chapleau, mon directeur de thèse, pour ses judicieux conseils qui ont été d'une importance capitale dans le déroulement de cette recherche.

Je remercie Monsieur Claude Boucher du Service de la Planification de la Commission des Transports de la Communauté Urbaine de Montréal pour avoir mis à ma disposition les données de base des analyses empiriques et m'avoir permis l'accès à toutes les ressources informatiques dont il disposait.

Je désire exprimer ma gratitude à la Pontificia Universidad Católica de Chile pour son important appui financier.

Merci à Madame Lucie Azancot pour son excellent travail de dactylographie et à Monsieur Marcel Dufault responsable de la partie graphique de cette thèse.

Mes remerciements vont aussi à mes camarades de la section de Transport de l'Ecole Polytechnique avec qui j'ai eu la possibilité de discuter plusieurs fois des différents aspects de ma recherche.

Finalement, je remercie mon épouse Nere pour sa patience et son aide à l'étape de la correction du manuscrit et mes enfants Javier et Maite pour leur compréhension chaque fois qu'une activité familiale a dû être ajournée à cause de mon travail.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Sommaire	iii
Abstract	vi
Remerciements	viii
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xv
CHAPITRE I - INTRODUCTION	1
1.1 Les sources d'erreur des modèles d'affectation	1
1.2 L'importance relative des sources d'erreur reliées aux hypothèses des modèles	2
1.3 Contenu de la thèse	5
CHAPITRE II - LES MODÈLES OPERATIONNELS D'AFFECTATION DE RESEAUX DE TRANSPORT EN COMMUN . .	6
2.1 Introduction	6
2.2 Description des modèles plus utilisés	9
2.2.1 UTPS (Urban Transportation Planning System)	9
2.2.2 TRANSCOM (TRANSport en COMmun)	10
2.2.3 TRANSEPT	14
2.2.4 Les modèles interactifs graphiques: RHITUC et NOPTS	16
2.2.5 Autres modèles d'affectation	18
CHAPITRE III - LE COMPORTEMENT DES USAGERS DU TRANSPORT EN COMMUN FACE AU CHOIX D'ITINERAIRES	23
3.1 Les modèles de choix	23
3.2 Interprétation des algorithmes d'affectation en transport en commun	28
3.3 Le problème d'agrégation spatiale	34

Page

3.4 La diversion du flot entre deux zones: pourquoi se produit-elle ? 38

CHAPITRE IV - METHODOLOGIE 42

4.1 Introduction 42

4.2 Quelques définitions 43

4.3 Etude sur le comportement des voyageurs 49

4.3.1 Information de base 49

4.3.2.1 Validation des réponses de l'enquête O-D 52

4.3.2.2 Génération des itinéraires simulés 53

4.3.2.3 Analyse des itinéraires décrits et simulés 54

4.3.3 La fonction d'impédance 55

4.3.3.1 Chemins entre noeuds du réseau 55

4.3.3.2 Chemins entre centroïdes 56

4.3.4 Calibration de l'algorithme de calcul de chemins 57

CHAPITRE V - ANALYSE EXPERIMENTALE 59

5.1 Introduction 59

5.2 Analyse de comparaison de type 1 61

5.2.1 Calibration de la fonction d'impédance . 61

5.2.1.1 Les paramètres de la fonction d'impédance 61

5.2.1.2 Comparaison désagrégée d'itinéraires décrits et simulés . . . 62

5.2.1.3 Les indicateurs globaux 68

5.2.1.4 Les indicateurs d'agrégation moyenne 71

5.2.2 Comportement de différents groupes d'usagers face au choix d'itinéraires 78

5.3 Analyse de comparaison de type 2 83

5.4 Analyse de comparaison de type 3 84

Page

5.4.1 Détermination des noeuds et des temps d'accès 84
5.4.2 Comparaison d'itinéraires décrits et simulés 90
5.5 Synthèse des résultats et conclusion 91

CHAPITRE VI - DESCRIPTION DES MODÈLES PROPOSES 103

6.1 Introduction 103
6.2 Structure générale du modèle d'affectation 105
6.3 L'accès au réseau de transport en commun 119
6.3.1 Formulation du problème 119
6.3.2 Détermination des noeuds d'accès potentiel d'une zone 120
6.3.2.1 Détermination de la région d'accès R_A 122
6.3.2.2 Recherche des noeuds d'accès potentiel d'une zone 125
6.4 Les algorithmes de cheminement 134
6.4.1 L'algorithme C.T.M. modifié (CMPC) . . . 134
6.4.2 L'algorithme SIMITI (SIMule ITInéraires) 138
6.4.3 Réseau exemple: accès aux noeuds vs accès aux liens 142
6.5 Diversion de chemins entre zones 145
6.5.1 Formulation du problème 145
6.5.2 Population et activité concentrées aux centroïdes des zones 146
6.5.3 Population et activité réparties à l'intérieur des zones 149

CHAPITRE VII - TESTS DES PROGRAMMES DEVELOPPES . . . 157

7.1 Ressources informatiques requises 157
7.2 Quelques résultats 158

Page

CHAPITRE VIII - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 163

8.1 Les principaux résultats des analyses de comparaison d'itinéraires 163

8.2 Les conclusions plus importantes 165

8.3 Recommandations: l'importance des études empiriques 169

Références 171

LISTE DES TABLEAUX

Numéro	Titre	Page
2.1	Résumé des caractéristiques principales des modèles opérationnels d'affectation en transport en commun	22
3.1	Illustration de la variabilité des temps d'accès	37
5.1	Paramètres de la fonction d'impédance (hors véhicule)	61
5.2	Résultats des comparaisons (type 1) entre itinéraires décrits et simulés	63
5.3	Différence entre le nombre de sections de lignes empruntées dans les itinéraires simulés et décrits (q-p)	65
5.4	Indicateurs globaux obtenus du chargement sur le réseau des itinéraires décrits et simulés (type 1)	69
5.5	Statistiques de comparaison d'itinéraires décrits et simulés de type 1 (niveau d'agrégation moyen)	73
5.6	Classification des déplacements par type	79
5.7	Coefficients de contingence entre le "type de déplacement" et certaines variables indépendantes	81
5.8	Résultats de la comparaison (type 2) entre itinéraires décrits et simulés	85
5.9	Indicateurs globaux obtenus du chargement sur le réseau des itinéraires décrits et simulés (type 2)	85
5.10	Statistiques de comparaison d'itinéraires décrits et simulés de type 2 (niveau d'agrégation moyen)	86
5.11	Résultats de comparaison (type 3) entre itinéraires décrits et simulés	92

Numéro	Titre	Page
5.12	Indicateurs globaux obtenus du chargement sur le réseau des itinéraires décrits et simulés (type 3)	93
5.13	Statistiques de comparaison d'itinéraires décrits et simulés de type 3 (niveau d'agrégation moyen)	94
5.14	Résultats des comparaisons entre itinéraires décrits et simulés	100
5.15	Indicateurs globaux obtenus du chargement sur le réseau des itinéraires décrits et simulés . .	101
5.16	Coefficients r^2 entre certaines paires de variables (décrites-simulées) pour les trois types de comparaisons	102
7.1	Besoins d'ordinateur (mémoire et temps de calcul) des différents modules du modèle d'affectation développé.	159
7.2	Indicateurs globaux du comportement du réseau (chargement avec diversion)	160

LISTE DES FIGURES

Numéro	Titre	Page
3.1	Structure d'un modèle de choix hiérarchique . .	26
3.2	Effet de la codification du réseau sur l'affectation probabiliste multichemin	31
3.3	Exemple d'accès au réseau	35
4.1	Schéma de la méthodologie utilisée	44
4.2	Schéma de la région d'étude	51
4.3	Procédure de calibration des paramètres de la fonction d'impédance sur le réseau de transport en commun	58
5.1	Profils de charge: ligne 1 du métro (comparaison de type 1)	74
5.2	Profils de charge: ligne 2 du métro (comparaison de type 1)	75
5.3	Effet d'une mauvaise calibration (THVS=$\sum_{j=1}^{q} i_j/2$) sur les profils de charge de la ligne 2 du métro (comparaison de type 1)	76
5.4	Distribution de la distance voyagée sur le réseau (comparaison de type 1)	77
5.5	Variation du pourcentage de paires différentes avec le nombre de sections de lignes de l'itinéraire décrit	82
5.6	Profils de charge: ligne 1 du métro (comparaison de type 2)	87
5.7	Profils de charge: ligne 2 du métro (comparaison de type 2)	88
5.8	Distribution de la distance voyagée sur le réseau (comparaison de type 2)	89

Numéro	Titre	Page
5.9	Profils de charge: ligne 1 du métro (comparaison de type 3)	95
5.10	Profils de charge: ligne 2 du métro (comparaison de type 3)	96
5.11	Effet d'une mauvaise calibration ($THVS=\sum_{j=1}^{q} i_j/2$) sur les profils de charge de la ligne 2 du métro (comparaison de type 3)	97
5.12	Distribution de la distance voyagée sur le réseau (comparaison de type 3)	98
6.1	Schéma du module STRUCT	107
6.2	Schéma du module ACCES	109
6.3	Schéma du module EXPAN	112
6.4	Schéma du module CHEMIN	114
6.5	Schéma du module DIVERSION	116
6.6	Schéma du module CHARGE	118
6.7	Noeuds d'accès potentiels et chemins potentiels entre paires de zones	120
6.8	Région d'accès (R_A) d'une zone	121
6.9	Approximation du contour d'une zone	122
6.10	Exemple de codification des frontières des zones	123
6.11	Région d'accès d'une zone, Z, avec population et activité distribuées en son intérieur . . .	124
6.12	Exemple d'accès à un lien	126
6.13	Région d'accès potentiel (R_A) et région de noeuds candidats (R_c)	127
6.14	Exemples d'acceptation et de rejet de liens "candidats"	129
6.15	Recherche de points à l'intérieur d'un polygone. Méthode des intersections topologiques	133

Numéro	Titre	Page
6.16	Illustration de l'algorithme SIMITI	140
6.17	Problème exemple: accès aux noeuds	143
6.18	Problème exemple: accès aux liens	144
6.19	Choix de chemins entre deux centroïdes	147
6.20	Choix de chemins entre deux points aléatoires (Px,Py) à l'intérieur des zones O et D	150
6.21	Zones divisées en sous-zones	154

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Les sources d'erreur des modèles d'affectation

Les modèles d'affectation jouent un rôle important dans le processus de planification des sytèmes de transport urbain. Ils constituent, en effet, des instruments privilégiés pour l'évaluation d'alternatives lors des études de choix de grands investissements à long terme (planification stratégique) ou encore dans des études de court et moyen terme de type réaménagement de réseau (planification opérationnelle). Cependant, même si au niveau global ils permettent d'obtenir des résultats acceptables, leurs résultats au niveau désagrégé peuvent être significativement différents de la réalité.

Les sources les plus importantes d'erreur des modèles d'affectation peuvent être classifiées en trois groupes:

- Les sources reliées aux hypothèses des modèles
- Les sources reliées aux données d'entrée
- Les sources reliées à l'utilisation des modèles.

Le premier groupe, qui est celui qui attire notre attention dans cette recherche, concerne les hypothèses des modèles sur le comportement des voyageurs ainsi que le niveau de résolution du problème (agrégation

spatiale) auquel est étroitement lié le problème de la simulation de l'accès au réseau.

En ce qui concerne les données d'entrée des modèles d'affectation, nous faisons mention, principalement, à la matrice origine-destination de déplacements (soit qu'elle provienne d'une enquête ou qu'elle soit déduite des étapes précédentes de la procédure séquentielle classique de transport dont les modèles d'affectation font partie) et à la codification simplifiée (pour représentation informatique) des réseaux de transport correspondants.

En ce qui touche l'utilisation des modèles il faut souligner la spécification de la fonction d'impédance ou coût généralisé de voyage (détermination des variables qui la composent) et la méthode de calibration utilisée.

Tout en reconnaissant l'importance des trois groupes de sources d'erreur signalées, notre travail est centré , comme nous l'avons déjà dit, sur l'étude des sources reliées aux hypothèses des modèles mêmes.

1.2 L'importance relative des sources d'erreur reliées aux hypothèses des modèles

Une révision de la littérature pertinente indique que même si les hypothèses sur le comportement des voyageurs face au choix d'itinéraires et le problème de l'agrégation spatiale sont reconnus comme causes de biais lors de l'affectation des déplacements sur le réseau, leur impor-

tance relative n'a jamais été établie. Cependant, le développement des nouveaux modèles a été centré principalement sur la représentation fidèle du comportement des voyageurs.

Les modèles de simulation des déplacements sur un réseau routier ont été l'objet de plusieurs développements méthodologiques durant la décennie 70. Ils vont de l'utilisation des procédures de type tout ou rien (distribution du flot sur le réseau aux chemins d'impédance minimale, indépendante de la capacité), améliorés par l'adjonction de contraintes de capacité ou par une approche probabiliste multichemin, jusqu'à l'emploi de méthodes d'équilibre (affectation basée sur les principes de Wardrop). Il est en général reconnu que ces dernières méthodes fournissent de meilleurs résultats et que leurs hypothèses concernant le comportement des usagers sont plus justes.

En ce qui concerne les réseaux de transport en commun, où la modélisation du déplacement du voyageur demande implicitement une représentation explosée du réseau, les développements méthodologiques ont été plus limités. En effet, les modèles opérationnels existants correspondent, en général, à des adaptations de modèles d'affectation routière du type tout ou rien d'abord et probabilistes multichemin, ensuite.

Le fait qu'en réalité des voyageurs qui se déplacent entre la même paire de zones origine-destination empruntent des chemins différents, a signifié le rejet des modèles tout ou rien, au moment où on s'entend pour dire que les modèles probabilistes multichemin sont plus

satisfaisants (1). Cette façon d'analyser la valeur des deux types de modèles d'affectation présente, à notre avis, une erreur importante. En effet, étant donné l'incapacité d'un modèle tout ou rien de reproduire le phénomène de diversion (ce qui pourrait être dû au problème d'agrégation spatiale), on conclut que les hypothèses de ces modèles, concernant le comportement des voyageurs sont invalides.

C'est à ce problème (ou confusion) que cette recherche tente de trouver une réponse, en se fondant sur une étude empirique de grande envergure, qui utilise les résultats d'une enquête origine-destination de déplacements, réalisée en 1978 à Montréal par la Commission de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal (CTCUM).

Quelques 17.000 itinéraires individuels effectués sur le réseau de transport en commun, pendant la période de pointe du matin ont été l'objet de soigneuses analyses afin d'évaluer deux aspects:

- L'incidence du problème d'agrégation spatiale sur les performances d'un modèle d'affectation tout ou rien,
- La justesse des hypothèses normales faites quant au comportement des usagers face au choix d'itinéraires.

Cette démarche nous semble cruciale, avant de décider où investir nos efforts visant à améliorer les modèles d'affectation opérationnels déjà existants.

---

(1) Une discussion plus vaste sur le sujet sera présentée au chapitre III.

1.3 Contenu de la thèse

Cette thèse a été divisée en huit chapitres. Après un premier chapitre présentant en général l'importance des modèles d'affectation et de leurs sources d'erreur, les chapitres II et III sont consacrés à la description des modèles opérationnels d'affectation de transport en commun et à une discussion des hypothèses les plus importantes. Le chapitre IV contient une description de la méthode expérimentale développée pour l'analyse d'itinéraires et donne un bref aperçu des outils informatiques utilisés.

Le chapitre V présente les principaux résultats obtenus, à différents niveaux d'agrégation, tandis que le chapitre VI, à partir des hypothèses fondées sur les résultats précédents, propose une structure générale d'un modèle d'affectation, à caractère séquentiel et modulaire. En outre, on y présente des modèles alternatifs pour différents modules.

Le chapitre VII présente de nouveaux résultats, en égard ici, à l'application de certains des modèles proposés au cas de Montréal, l'objet fondamental étant le test du fonctionnement des programmes informatiques élaborés et la preuve de la faisabilité d'utilisation du modèle complet dans des études de réseaux de grande taille.

Finalement, le chapitre VIII résume les conclusions les plus importantes de cette étude et les recommandations pour des recherches futures.

CHAPITRE II

LES MODÈLES OPERATIONNELS D'AFFECTATION DE RESEAUX DE TRANSPORT EN COMMUN

2.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre un aperçu des caractéristiques les plus importantes des modèles opérationnels d'affectation de réseaux de transport en commun. Pour ce faire, nous décrivons sommairement dans la section 2.2 quelques modèles dont l'ensemble nous a paru représentatif de l'état de l'art dans cette matière.

Tous les modèles analysés ont en commun les aspects suivants:

a) On suppose que la population et les activités des zones de la région d'étude sont concentrées en des points fictifs nommés centroïdes.

b) Un réseau détaillé, codifié pour représentation informatique, est requis.

c) Ils comportent, au moins, un module qui produit la représentation informatique du réseau, un module de calcul de chemins et un module qui charge la demande de déplacements origine-destination aux chemins déterminés par le module précédent.

Les différences sont très variées. Parmi les plus importantes, on retrouve: les hypothèses concernant le comportement des voyageurs face au choix de routes, la manière dont ils traitent le problème de

l'accès (entrée et sortie) au réseau de transport en commun, le type de relation existant entre l'utilisateur du modèle et l'ordinateur et la façon avec laquelle ils considèrent l'interaction entre le réseau de transport en commun et le réseau routier.

Quant aux hypothèses sur le comportement des voyageurs face au choix de routes, les modèles examinés se divisent en deux types. D'une part, les modèles "tout ou rien" supposent que les passagers qui se déplacent entre deux zones données utilisent tous le même chemin, "le plus court". D'autre part, les modèles "multichemins" supposent que les voyageurs n'ont pas une parfaite perception des longueurs de leurs chemins alternatifs et qu'en conséquence, il y a un ensemble de chemins possibles pour se rendre d'une zone d'origine à une zone de destination.

En ce qui concerne le traitement de l'accès, on retrouve deux approches pour déterminer les liaisons entre les centroïdes des zones et les noeuds du réseau de transport en commun. Dans les modèles "d'accès manuel", ces liens sont créés à l'étape de la codification du réseau. Les modèles "d'accès automatique" créent ces liens implicitement, à l'aide d'un module d'accès qui prend comme données la représentation interne du réseau analytique et les coordonnées des noeuds et des centroïdes des zones.

Si l'on considère la relation entre l'analyste de transport et l'ordinateur, les modèles d'affectation peuvent être classés en

"interactifs" et "non interactifs". Dans le premier cas, l'utilisateur communique avec la machine par l'intermédiaire d'un écran graphique. Cette relation "permet de définir ou de modifier de manière interactive les tracés des lignes d'un réseau de transport en commun et d'en évaluer immédiatement l'impact grâce à l'affichage sur l'écran des résultats provenant de l'affectation de la demande de déplacements sur les lignes", Rapp (1974). Dans le cas des modèles non interactifs, les données sont entrées de façon traditionnelle (cartes perforées, fichiers sur disque, etc..), les programmes sont exécutés en traitement par lots et l'utilisateur doit analyser les "listes" de résultats.

L'interaction entre le transport en commun et le transport routier n'est pas traitée dans la plupart des modèles opérationnels existants. En effet, l'affectation aux deux réseaux se réalise, généralement, de façon indépendante. Une autre classe de modèle considère cette interaction, explicitement, à l'étape d'affectation. Après une affectation d'équilibre sur le réseau routier (qui considère le flot des véhicules de transport en commun), l'affectation au réseau de transport en commun se réalise en utilisant des temps sur les liens qui sont des fonctions des temps d'équilibre obtenus précédemment. Ce processus (incluant l'étape de répartition modale) se fait itérativement et il arrête quand les coûts sur le réseau de transport en commun, utilisés lors de l'affectation, ne sont pas sensiblement différents des coûts considérés à l'étape de répartition modale.

2.2 Description des modèles les plus utilisés

2.2.1 UTPS (Urban Transportation Planning System)

Le modèle UTPS est un ensemble de programmes (pour les systèmes IBM 360/370) destiné à la planification à long terme de systèmes multimodaux de transport. Le logiciel, développé et soutenu conjointement par UMTA (Urban Mass Transportation Administration) et FHWA (Federal Highway Administration), trouve ses origines, en ce qui concerne les programmes d'analyse de réseau, dans "Housing and Urban Development (HUD) Transit Planning Programs", un logiciel développé par la firme Alan M. Voorhes avant 1969 (voir Dial et Bunyan, 1968).

Les principaux modules utilisés pour l'analyse de réseaux sont:
UNET (1) qui lit les données du réseau (liens et lignes) et produit une représentation du réseau traitable par l'ordinateur,
UPATH qui détermine les arbres de chemins d'impédance minimale, et
ULOAD, qui charge la demande de voyages sur les chemins déterminés par UPATH.

En ce qui concerne la représentation du réseau, les données de base de UNET, comme dans les modèles d'affectation routière, sont les liens (liens d'accès entre centroïdes et noeuds du réseau, liens de transport en commun, liens de marche entre lignes de transport en commun, etc). Pour chacun de ces liens, il faut fournir ses noeuds

---

(1) INET dans les dernières versions (voir Dial, Rutherford et Quillian, 1979).

extrémités, le temps (ou la vitesse) de parcours, le mode et, s'il y a lieu, les numéros des lignes de transport qui le traversent. En plus, les lignes sont définies par leur mode, intervalle et séquence de noeuds.

L'affectation (effectuée par UPATH et ULOAD) est du type "tout ou rien" entre centroïdes de zones. L'algorithme de cheminement utilisé est une adaptation de celui de Moore (Dial, 1967). Si pour se déplacer entre deux points (soient-ils les extrémités des déplacements ou des points intermédiaires) les voyageurs font face à des lignes communes, l'algorithme charge toutes les lignes communes du même mode, en général, proportionnellement à leurs fréquences. S'il y a des lignes communes appartenant à différents modes, tout le flot est chargé au mode le plus rapide (on considère la fréquence combinée des lignes ainsi que le temps de parcours en véhicule).

Quant à la taille des problèmes pouvant être traités, UTPS permet d'analyser des grands réseaux. Des valeurs maximales de l'ordre de 2500 centroïdes, 8000 noeuds, 1200 lignes et 32.000 liens sont mentionnées dans la littérature.

2.2.2 TRANSCOM (TRANSport en COMmun)

"Le système TRANSCOM est un ensemble de procédures qui a pour principal objectif de réaliser l'affectation des déplacements sur un réseau de transport en commun, et ce, dans le contexte d'un problème de grande taille. Sa fonction principale consiste à esti-

mer les valeurs de flots sur chacun des tronçons du réseau" (Chapleau et Trottier, 1978). Il a été développé au département d'Informatique de l'Université de Montréal en 1974 et depuis cette date, il a été le principal outil d'analyse de réseaux de la CTCUM (Commission de Transports de la Communauté Urbaine de Montréal).

La conception du système repose sur quatre modules principaux (Chapleau, 1974). Le module PUBTRAN lit les données décrivant le réseau de transport en commun, vérifie la compatibilité de ces données et produit une représentation interne du réseau aux besoins des modules suivants. A la différence d'UTPS, l'élément de base du réseau analytique est la ligne et non pas le lien. Pour chaque ligne, on doit fournir comme données ses caractéristiques (vitesse commerciale, intervalle, distance réelle du trajet) et la description de son parcours (séquence ordonnée des noeuds traversés). En plus, il faut rentrer l'ensemble des noeuds (points d'entrée, de sortie, ou de correspondance entre les lignes) auxquels sont associées des coordonnées géographiques.

Le module ACCES, détermine, sans expliciter les liens artificiels de marche, l'affectation des déplacements hors réseau. Cela, à partir de la représentation interne du réseau crée par PUBTRAN et des coordonnées des centroïdes des zones. Il transpose, suivant des règles imposées par l'utilisateur du modèle, la matrice O-D interzone en une matrice O-D entre les noeuds du réseau.

De même qu'UTPS, l'affectation (réalisée par les modules

CHEMIN et CHARGE) est du type "tout ou rien" aux chemins "les plus courts" entre noeuds du réseau. TRANSCOM offre à l'utilisateur trois algorithmes de cheminement: les deux premiers, CTM (chemins à temps minimum) et CTPM (chemins à temps perçu minimum) suivent la méthode d'étiquetage de Dijkstra (voir Chriqui, 1974 et 1975) tandis que le troisième, TRAMIN (chemins à transfert minimum) est une application du premier algorithme de Moore utilisant des distances unitaires sur les arcs; dans ce cas les arcs d'un réseau conventionnel sont remplacés par des sections de lignes (voir Chapleau, 1974). CTM calcule les chemins les plus courts sans tenir compte de l'existence de lignes communes, tandis que CTPM essaie de simuler la "perception" de l'offre par les voyageurs quand ils font face à des lignes communes. Si l'on suppose : a) que pour se déplacer entre deux points du réseau un voyageur a un ensemble $L = \{\ell_1, \ell_2 \ldots \ell_n\}$ de lignes possibles, avec fréquences $F_1, F_2 \ldots F_n$ et temps de voyage sur le réseau de $TD_1, TD_2 \ldots TD_n$, b) que les temps d'attente de chaque ligne (fonction de la fréquence, par exemple, une constante K, multipliée par l'intervalle) sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, c) que le temps à attendre un véhicule ne dépend pas du temps déjà passé à l'attendre, le temps total, TV, (attente et déplacement en véhicule) appréhendé par un voyageur qui décide d'emprunter le véhicule de la première ligne arrivant à l'arrêt sera:

$$TV = \frac{K + \sum_{i=1}^{n} TD_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^{n} F_i} \qquad (2.1)$$

L'algorithme CTPM de TRANSCOM suppose que l'usager, au lieu de prendre la première ligne de l'ensemble L arrivant à l'arrêt, emprunte la première ligne qui appartient à un sous-ensemble L' de L qui rende TV optimal. Soit $X = x_1, x_2 \ldots x_i \ldots x_n$ un vecteur dont $x_i = 1$ si la ligne $\ell_i \in L'$ et $x_i = 0$ autrement. Le problème est alors:

$$\text{Min (TV)} = \min_X \frac{K + \sum_{i=1}^{n} TD_i \, F_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} F_i x_i} = \min_X \frac{a_o + \sum_{i=1}^{n} a_i x_i}{b_o + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i} \qquad (2.2)$$

où $a_i, b_i, i = 0,1,\ldots n$ sont tous non négatifs.

Chriqui (1974) propose un algorithme simple de solution de ce problème de programmation hyperbolique {0,1} sans restriction, pour le cas particulier où $a_o = 1$, $b_o = 0$ et $a_i/b_i = TD_i$.

Une fois déterminé le sous-ensemble de lignes L', le flot est chargé entre elles, proportionnellement à leurs fréquences. CTPM, par rapport à CTM, a le désavantage d'être environ six fois plus lent (voir Chapleau, 1974).

Quant à la taille des problèmes traités, TRANSCOM a été testé sur un ordinateur CYBER 74 avec un réseau pilote de la CTCUM d'environ 600 noeuds et 150 lignes. Sur l'ordinateur IBM 3031 de la CTCUM des réseaux comportant plus de 2000 noeuds et 200 lignes sont habituellement analysés.

2.2.3 TRANSEPT

TRANSEPT est un modèle qui évalue l'impact à court terme des changements introduits dans un réseau d'autobus. Il a été développé par LGORU (Local Government Operational Research Unit) pendant la réalisation d'une étude à la ville de Coventry en Angleterre. Daly (1973), Daly et Rogers (1973), Daly et al (1973), Achim et al (1976) et Last et Leak (1976) présentent une description détaillée de l'étude réalisée et des aspects les plus importants du modèle.

La supposition de base de TRANSEPT est que les voyageurs qui se déplacent entre deux endroits définis du réseau, utilisent tous le même chemin géographique. Ce chemin étant celui de coût généralisé minimum. En ce qui concerne la représentation du réseau de transport en commun, les lignes sont considérées comme une séquence de liens. "Un lien est un ensemble d'arrêts entre lesquels il n'y a pas de lignes qui y commencent, terminent, convergent ou divergent" (Last et Leak, 1976). D'autres données sur les lignes sont: le type d'autobus utilisé, le nombre d'autobus affectés et le temps de parcours. Dans une première étape le modèle identifie pour chaque zone des liens d'accès potentiels. Après, pour chaque paire origine-destination, les coûts généralisés par mode (autobus, auto, marche) sont calculés. Dans le cas de l'autobus le nombre de chemins possibles entre deux zones dépend du nombre de noeuds d'accès aux extrémités du déplacement. Le nombre maximum de chemins entre deux zones est fixé par l'utilisateur et le programme sélectionne alors ceux du plus petit coût généralisé.

Le calcul de la proportion de voyageurs sur chacun des chemins possibles se fait à l'aide d'un modèle "multinomial logit". Ainsi, la probabilité PB_i , qu'un individu qui se déplace entre une paire O-D donnée emprunte le chemin d'autobus i (parmi "n" chemins d'autobus possibles) est:

$$PB_i = \frac{\exp(-\lambda\ ZB_i)}{\exp(-\lambda ZC+\delta_c) + \exp(-\lambda ZW) + \sum_{K=1}^{n} \exp(-\lambda ZB_k + \delta_b)} \qquad (2.3)$$

où ZC, ZW et ZB_k représentent les coûts généralisés de voyage en auto, marche à pied et autobus par le chemin k respectivement. λ est un paramètre de calibration et δ_c et δ_b sont des mesures de la préférence de l'auto et de l'autobus par rapport à la marche à pied. Pour surmonter les problèmes posés par l'utilisation des modèles du type logit (notamment celui de l'existence d'alternatives correlées), un modèle logit hiérarchique a été incorporé dernièrement (voir Ortuzar, 1980).

Finalement, les voyageurs sont affectés aux différents chemins. Ils sont distribués entre les lignes communes en tenant compte de la capacité et du temps d'attente de chaque ligne. Un processus itératif est utilisé pour obtenir une solution stable. Etant donné que le chargement se fait lien après lien, pour chaque route, la procédure semble adéquate seulement pour des réseaux radiaux.

Quant à la taille des réseaux pouvant être traités par TRANSEPT, rien n'est dit dans la documentation disponible. Seulement

il est mentionné que la population de la ville de Coventry était à l'époque (1972) d'environ 400.000 habitants et que le nombre de lignes d'autobus du réseau proposé était de 40. Cela indique que fort probablement il s'agit d'un petit réseau.

2.2.4 Les modèles interactifs graphiques: RHITUC et NOPTS

Le développement des modèles interactifs graphiques comme outils de planification de transport a son origine dans le Programme de Transport Urbain de l'Université de Washington. Les travaux de recherche de M. H. Rapp, sous la direction des professeurs E.M. Horwood et J.B. Schneider, ont eu une importance particulière. Le modèle IGTDS (Interactive Graphic Transit Design System) est un des premiers résultats de cette recherche. Il sert à analyser des systèmes de transport en commun du type "many to one" où les déplacements provenant de plusieurs origines convergent tous à une seule destination (voir Schneider et Gehner 1973, Rapp 1972a, 1972b, 1972c et U.S. Department of Transportation 1978).

Des développements de IGTDS ont donné origine à UTRANS (Urban Transit Analysis System), RHITUC (Recherche Heuristique d'Itinéraires de Transports Urbains Collectifs), NOPTS (Network Optimization System) et ITAM (Interactive Transit Assignment Model), qui est le nom sous lequel NOPTS est distribué aux Etats-Unis. Le premier modèle, comme IGTDS, est du type "many to one", tandis que les autres servent à analyser des systèmes du type "many to many", c'est-à-dire, avec plusieurs

origines et destinations de déplacements. Etant donné le caractère plus général, nous décrivons par la suite les modèles NOPTS et RHITUC. Ces deux modèles sont presque identiques. Seulement leurs environnements informatiques sont différents. RHITUC a été développé à l'ITEP en Suisse (Institut de Technique de Transports) et comporte un ensemble de programmes informatiques implémentés sur un ordinateur CDC Cyber 7326. NOPTS correspond au même ensemble de programmes écrits et adaptés pour être utilisés sur un mini-ordinateur.

Ces modèles ont été créés en mettant l'accent non seulement sur l'interactivité mais également sur l'intégration des diverses étapes de planification opérationnelle. Ils peuvent être définis comme la juxtaposition:

- d'une base de données dont le rôle est la description permanente des composantes du système étudié et de leurs interactions;
- d'un certain nombre de modules ou programmes interactifs permettant de définir, de modifier, de compléter et d'analyser l'état du système étudié sous la forme où il est représenté.

(Rapp, M.H. et Mattenberger, Ph., 1977).

Les données de base des modèles sont les noeuds et les liens potentiels du système de transport en commun (train, métro, rues disponibles pour les services d'autobus, liens piétonniers, etc.), la demande (sous la forme d'une matrice origine-destination de déplacements) et

les données concernant les véhicules disponibles (types, capacité, coûts d'opération, etc..).

Pour chaque scénario à évaluer il faut entrer comme données les lignes (définies comme une séquence de stations), le type de véhicule sélectionné pour chaque ligne et la fréquence des services.

Un modèle d'affectation a comme rôle de simuler le comportement des usagers face à l'offre de transport. L'algorithme de cheminement utilisé est le multichemin probabiliste de Dial (voir Dial, 1971), appliqué sur un réseau homogène. Des noeuds et des liens virtuels sont ajoutés (implicitement) au réseau codifié par l'analyste pour représenter les temps de transfert entre lignes, les temps d'attente et les temps de marche.

RUITUC et NOPTS ont été utilisés pour l'analyse de réseaux de taille moyenne (de l'ordre de 200 noeuds, 50 lignes et 1000 liens). Même si les rapports revisés ne mentionnent pas le problème posé par la taille du réseau à traiter, il semble que l'addition de noeuds et des liens virtuels constitue une limitation à l'utilisation de ces modèles dans l'analyse de réseaux de grande taille.

2.2.5 Autres modèles d'affectation

Plusieurs modèles de caractéristiques similaires à ceux qu'on vient de présenter pourraient être ajoutés à la liste de modèles opérationnels d'affectation en transport en commun.

Le modèle EMME (Equilibre Multimodal - Multimodal Equilibrium), développé par le Centre de Recherche sur les Transports de l'Université de Montréal, avec la coopération de la Ville de Winnipeg, est un modèle pour la planification intégrée de transport urbain, basé sur la théorie d'équilibre dans les réseaux de transport. La principale différence de EMME par rapport aux modèles traditionnels de planification de transport urbain est qu'au lieu d'être séquentiel, il est simultané (Achim et Florian, 1979). Ainsi, les demandes obtenues pour chaque mode et les temps de voyage sont consistants dans le sens que la répartition modale est prédite en utilisant les temps de déplacement obtenus pour les deux réseaux (transport en commun et routier). Le modèle d'affectation de transport en commun de EMME est une version adaptée de TRANSCOM.

Florian (1977) présente les idées de base du modèle. Un des aspects les plus intéressants de EMME est la façon dont il considère l'interaction entre le transport en commun et le transport routier. L'affectation d'équilibre (voir Nguyen et James, 1975) au réseau routier considère que sur certains liens, il existe un flot fixe de véhicules de transport en commun. Après, l'affectation "tout ou rien", sur le réseau de transport en commun, utilise des temps de parcours qui sont une fonction des temps sur le réseau routier. On trouve plus d'informations sur les différentes étapes de EMME dans Achim et Chapleau (1976), Florian et al (1977), (1978), (1979a), (1979b), Achim (1979), Achim et Florian (1979).

TRANSITNET (voir Orchard et al 1972a, et 1972b) est un modèle

capacité. Développé dans un environnement académique, DODOTRANS dans son état actuel, ne peut pas être considéré comme un modèle opérationnel pour l'étude de grands réseaux. Un des aspects les plus critiques est le nombre de zones de la région d'étude. En moyenne, un temps de 2 minutes sur un ordinateur IBM 370/155 est rapporté pour un réseau desservant une région de 40 zones (Peat, Marwick, Mitchell et Co., 1973).

Le tableau 2.1 présente un résumé des caractéristiques principales des modèles opérationnels d'affectation en transport en commun.

d'affectation de réseaux de transport en commun développé au Greater London Council lors d'une étude de transport à Londres ayant comme objectif la détermination de l'impact de différentes modifications sur le réseau. C'est un modèle du type "tout ou rien" avec répartition entre lignes communes.

TERESE (TEst de RESEaux) est un modèle de prévision de la demande et d'affectation pour des réseaux de transport en commun, développé à l'Université de Grenoble (voir Khelifi et Uhry, 1978). L'algorithme de cheminement utilisé est une adaptation de l'algorithme de Dijkstra et le chargement tient compte des lignes communes. Le modèle sert à analyser des petits réseaux (maximum 250 sommets, centroïdes et noeuds, et 1500 liens).

DCO/TRANPLAN est un ensemble de programmes pour la planification du transport urbain, propriété de De Leuw , Cather and Company et Control Data Corporation, écrits pour le système Control Data 6600. En ce qui concerne les programmes d'analyse de réseaux de transport en commun, DCO/TRANPLAN permet des affectations "tout ou rien" au chemin le "plus court" ainsi qu'une affectation multichemin au moyen du programme STOCH, développé par R. Dial.

Finalement, il faudrait mentionner le modèle DODOTRANS (Decision Oriented Data Organizer TRansportation ANalysis System), un ensemble de programmes développés à l'Institut de Technologie de Massachusetts (MIT). La caractéristique principale du modèle d'analyse de réseaux est l'affectation incrémentale avec restriction de

MODÈLE	Algorithme d'affectation		Traitement de l'accès		Relation analyste - machine		Relation transport en commun/ transport privé	
	Tout ou rien	Multichemin	Manuel	Automatique	Interactif	Non interactif	Unimodal	Multimodal
DCO-TRANPLAN	x	x	x			x	x	
EMME (1)	x		x			x		x
HUD	x		x			x	x	
NOPTS		x	x		x		x	
RHITUC		x	x		x		x	
TERESE	x		x			x	x	
TRANSCOM	x			x		x	x	
TRANSEPT		x		x		x	x	
TRANSITNET	x		x			x	x	
UTPS	x		x			x	x (2)	
UTRANS	x		x		x		x	

(1) Une version interactive, EMME/2, est en développement.

(2) Le module INET, récemment développé, facilite certaines interactions bimodales

Tableau 2.1 Résumé des caractéristiques principales des modèles opérationnels d'affectation en transport en commun.

CHAPITRE III

LE COMPORTEMENT DES USAGERS DU TRANSPORT EN COMMUN FACE AU CHOIX D'ITINERAIRES

3.1 Les modèles de choix

L'hypothèse de base des modèles de choix est qu'un individu qui fait face à une situation de choix se comporte d'une façon rationnelle. Ce comportement rationnel consisterait à associer à chaque alternative a_i , d'un ensemble A d'alternatives possibles (i=1,2,...n), un niveau d'attrait (utilité) ainsi qu'à choisir celle ayant la plus grande utilité. Cette utilité est une fonction des caractéristiques de l'individu et de certains attributs des alternatives.

En général, les modèles opérationnels supposent pour l'utilité une forme fonctionnelle linéaire. Si un terme d'erreur additif est ajouté on est en présence des modèles de choix avec utilité aléatoire; autrement, ces modèles de choix sont dits déterministes.

Nous pouvons alors définir l'utilité de l'alternative $a_i \in A$ pour un individu choisi de façon aléatoire, par l'expression:

$$u_i = B.Z_i + \epsilon_i \qquad (3.1)$$

où B = vecteur de paramètres

Z_i = vecteur des caractéristiques de l'individu et des attributs de l'alternative a_i .

ε_i = variable aléatoire pour représenter les variations des valeurs des attributs de la fonction d'utilité entre les individus qui font face à l'ensemble d'alternatives A et des facteurs non observés.

Généralement le premier terme de l'expression (3.1), $B\,Z_i$ est appelé "utilité observée", "utilité moyenne" ou "utilité représentative" de la population qui fait face aux alternatives considérées (voir Domencich et Mc Fadden 1975, Sheffi 1978, Ortúzar 1980, etc). Evidemment si $\varepsilon_i = 0$ la fonction d'utilité est déterministe.

La probabilité P_i que l'alternative $a_i \in A$ soit choisie peut être exprimée comme:

$$P_i = P_r \{u_i \geq u_j \ , \ \forall \ a_j \in A\} = \int_{R_i} f(U)\, dU \qquad (3.2)$$

où $f(U)$ est la fonction de densité des probabilités conjointes du vecteur d'utilités aléatoires U, et R_i est la région définie par $u_i \geq u_j$, $\forall\, a_j \in A$. Evidemment si l'on ajoute aux individus la possibilité de ne pas choisir d' alternative (par exemple, ne pas faire un voyage) la région R_i doit être limitée aussi par la restriction $u_i \geq 0$.

Pour évaluer les probabilités P_i de l'expression (3.2) il faut connaître le vecteur d'utilités observées $\bar{U} = \{\bar{u}_1, \bar{u}_2 \ldots \bar{u}_i \ldots \bar{u}_n\}$ et la fonction de densité des probabilités conjointes du vecteur aléatoire $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2 \ldots \varepsilon_i \ldots \varepsilon_n\}$, $f(\varepsilon)$.

Dans les cas où les éléments ε_i de ε sont supposés indépendants et suivant des distributions de Weibull identiques, on obtient le modèle logit bien connu. L'équation (3.2) devient alors:

$$P_i = \int_{-\infty}^{\infty} f(\varepsilon_i)d\varepsilon_i \cdot \prod_{j \neq i} \int_{-\infty}^{\bar{u}_i - \bar{u}_j + \varepsilon_i} f(\varepsilon_j)d\varepsilon_j \qquad (3.3)$$

$$P_i = \frac{\exp\ (\phi\ \bar{u}_i)}{\sum_{j=1}^{n} \exp(\phi \bar{u}_j)} \qquad (3.4)$$

où le paramètre de dispersion ϕ est inversement proportionnel à l'erreur standard de la distribution de Weibull (Cochrane, 1975).

$$\phi = \frac{\pi}{\sqrt{6}\ \sigma} \qquad (3.5)$$

Le modèle multinomial logit, qui demeure très utilisé grâce à sa simplicité, a comme limitation la propriété de "l'indépendance des alternatives irrélevantes" (IIA). Cela signifie que le ratio entre les probabilités de deux alternatives quelconques est constant et indépendant des valeurs des utilités associées aux autres alternatives, i.e.

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{\exp\ \phi\bar{u}_i}{\exp\ \phi\bar{u}_j} = K \qquad (3.6)$$

Ce ratio K demeure invariant, même si l'ensemble d'alternatives varie (augmente ou diminue). Si le degré de corrélation, tout en étant petit,

varie pour différentes paires de variables, cette propriété constitue un problème sérieux du modèle logit.

Plusieurs modèles ont été proposés pour palier à cet inconvénient. Ortúzar (1980) présente une description détaillée des modèles de choix hiérarchiques dont les choix successifs des individus sont représentés dans la figure 3.1.

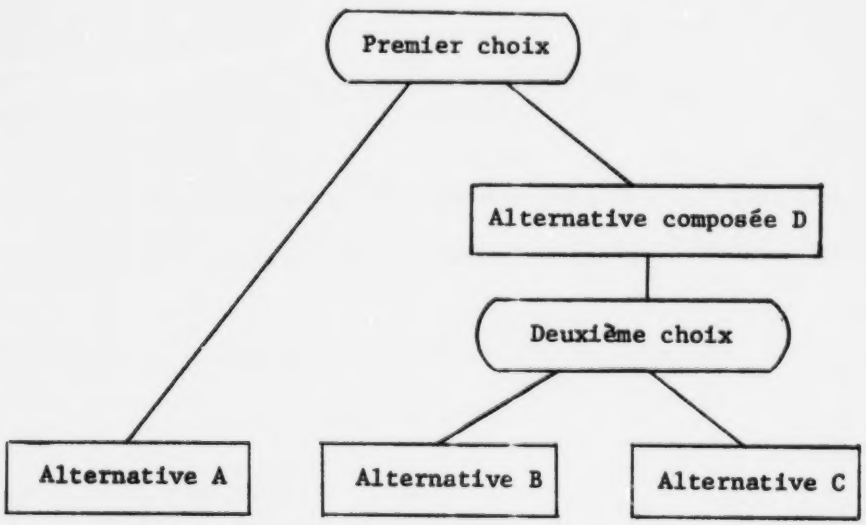


Figure 3.1 Structure d'un modèle de choix hiérarchique

Si à chacune des décisions le modèle de choix est du type logit, le modèle total est du type logit hiérarchique. La partie cruciale de ces modèles est la détermination de l'utilité de l'alternative composée (ensemble d'alternatives correlées).

Le modèle Dogit proposé par Gaudry et Dagenais (1979) vise

aussi à résoudre le problème posé par la propriété IIA. Ils définissent la probabilité P_i comme:

$$P_i = \frac{\exp(\bar{u}_i) + \phi_i \sum_{j=1}^{n} \exp(\bar{u}_j)}{(1 + \sum_{j=1}^{n} \phi_j) \sum_{j=1}^{n} \exp(\bar{u}_j)} \qquad \phi_i \geq 0 \ \forall \ i \qquad (3.7)$$

Il faut noter que le modèle dogit a comme cas particulier le modèle logit quand tous les paramètres ϕ_i sont égaux à zéro.

Un autre type de modèle de choix avec utilités aléatoires où les éléments du vecteur ε ne sont pas indépendants est le "multinomial probit". On suppose que la fonction $f(\varepsilon)$ est normale multivariée. La probabilité P_i est donnée par l'expression (3.8):

$$P_i = \int_{-\infty}^{\varepsilon_1 + \bar{u}_i - u_i} \int_{-\infty}^{\varepsilon_2 + \bar{u}_i - u_2} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\varepsilon_n + \bar{u}_i - \bar{u}_n} f(\varepsilon)\, d\varepsilon \qquad (3.8)$$

où:

$$f(\varepsilon) = (\frac{\pi}{2})^{n/2} \cdot \frac{1}{|\Sigma|} \exp(1/2\ \varepsilon^T . \Sigma^{-1} . \varepsilon) \qquad (3.9)$$

n = nombre d'alternatives

$|\Sigma|$ = déterminant de la matrice de covariance (Σ), de ε,

et la valeur espérée de ε , $E(\varepsilon) = 0$.

Le modèle probit est plus attrayant que le modèle logit mais, comme nous le verrons plus loin, il présente le problème que l'intégrale probit, expression (3.8), est très difficile à résoudre.

3.2 Interprétations des algorithmes d'affectation en transport en commun

Comme nous l'avons vu, lorsqu'on examine les modèles opérationnels d'affectation en transport en commun, on distingue principalement deux types d'hypothèses dans le choix des chemins. D'une part, les modèles du type "tout ou rien" supposent que les passagers, se déplaçant entre une zone origine et une zone destination, utilisent tous le même chemin "le plus court". D'autre part, les modèles du type "multichemin" (qui utilisent en général des adaptations de l'algorithme probabiliste de Dial) supposent que, étant donné un ensemble de chemins efficaces (1), même si le chemin "le plus court" demeure le plus probable, d'autres chemins ont aussi une probabilité non nulle d'être empruntés: le flot entre la paire de zones est alors affecté selon un ensemble de chemins raisonnables.

Les modèles "tout ou rien" sont des modèles déterministes de choix, où la fonction d'utilité de l'alternative $a_i \in A$, u_i , est égale à $\bar{u}_i$. Elle doit s'interpréter de la façon suivante:

a) tous les individus de la population qui font face à l'ensemble d'alternatives A ont une parfaite perception de tous les attributs de la fonction d'utilité .

---

(1) La spécification d'un chemin efficace est nécessaire pour empêcher l'affectation de déplacements le long d'un circuit; souvent on définira comme chemin efficace un chemin qui, en termes de coût ou distance, sera formé de liens permettent de s'éloigner de l'origine et/ou de se rapprocher de la destination.

b) Il n'y a pas d'autres attributs pertinents en plus de ceux qui ont été considérés dans le vecteur Z_i .

c) Le vecteur de paramètres B est le même pour tous les individus de la population en question.

Il est évident qu'en l'absence du vecteur aléatoire ε , $P_i = 1$ si a_i A est l'alternative de la plus grande utilité (ou de la plus petite désutilité dans ce cas)
$P_j = 0$ pour $\forall\ a_j \neq a_i$

Cette façon de modéliser le comportement des voyageurs a mérité de fortes critiques et enfin a été considérée comme faible. Peat, Marwick, Mitchell et Co (1973) disent qu'elle requiert une parfaite connaissance du réseau, que les usagers n'ont pas tous la même perception du temps des différentes étapes d'un voyage et, enfin, que même si les usagers pouvaient percevoir correctement la route la plus courte, étant donné que la capacité est limitée, ils devraient se répartir entre plusieurs "bonnes routes".

Un argument supplémentaire à ceux déjà énoncés réside dans le fait qu'on puisse observer, souvent dans la réalité, l'utilisation de plus d'un chemin entre une même paire de zones.

Daganzo, Bouthelier et Sheffi (1977) en se référant à l'affectation "tout ou rien" disent:

> "Il a été reconnu, cependant, qu'avec une telle approche déterministe le comportement observé et prédit peuvent être substantiellement différents, parce que des individus différents font souvent des choix différents..."

A propos du même sujet, Florian et Fox (1976), dans un document où ils discutent les limitations de l'algorithme de Dial, ajoutent:

> "L'algorithme ingénieux développé par Dial offre des avantages immédiats par rapport à la méthode d'affectation tout ou rien parce qu'il répartit les voyages entre des chemins alternatifs raisonnables, proportionnellement à la longueur (coût) de ces derniers."

L'autre approche, très utilisée en transport en commun pour simuler le comportement des voyageurs face au choix des routes est celui de l'affectation multichemin, en particulier l'algorithme probabiliste de Dial (voir par exemple Dial 1971, Peat, Marwick, Mitchell et Co., 1973 et Rapp, 1974). Comme on le verra, il peut être interprété soit comme un modèle multinomial logit ou comme un modèle simple d'entropie.

Considérons d'abord qu'un individu partant du centroïde O voulant se rendre au centroïde D a un ensemble A de chemins possibles (tous les chemins efficaces). En accord avec la théorie déjà vue, l'individu associera à chaque chemin $a_i \in A$ une utilité $\bar{u}_k$, $(B.Z_k)$ plus une erreur aléatoire ε_i qui peut être dûe aux effets non observables. Il est évident que si les erreurs $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \ldots \varepsilon_n$ sont supposées indépendantes avec distributions de probabilités Weibull identiques, les probabilités qu'un chemin donné soit emprunté seront

$$P_i = \frac{\exp(\phi\, \bar{u}_i)}{\sum_{j=1}^{n} \exp(\phi\, \bar{u}_j)} \quad , \forall\ a_i \in A$$

$$P_j = 0 \quad , \forall\ a_j \notin A \qquad (3.10)$$

où ϕ est un paramètre de diversion à calibrer.

Daganzo et Sheffi (1977) interprètent ce paramètre ϕ comme "un paramètre utilisé pour représenter l'incapacité des humains à percevoir exactement le temps de déplacement".

Même si ce n'est pas dit explicitement, le modèle de Dial suppose que les alternatives sont perçues comme indépendantes pour les usagers. Il arrive cependant que dans certains cas, il y a des alternatives qui ne sont pas perçues comme indépendantes, ce qui produit des simulations qui peuvent être fortement différentes de la réalité observée. L'exemple qui suit a été signalé par plusieurs auteurs, entre autres, Schneider (1973), Burrel (1976), Florian et Fox (1976), Daganzo et Sheffi (1977) etc. Il montre jusqu'à quel point le résultat d'une affectation peut être influencé par la codification du réseau (codification d'alternatives correlées).

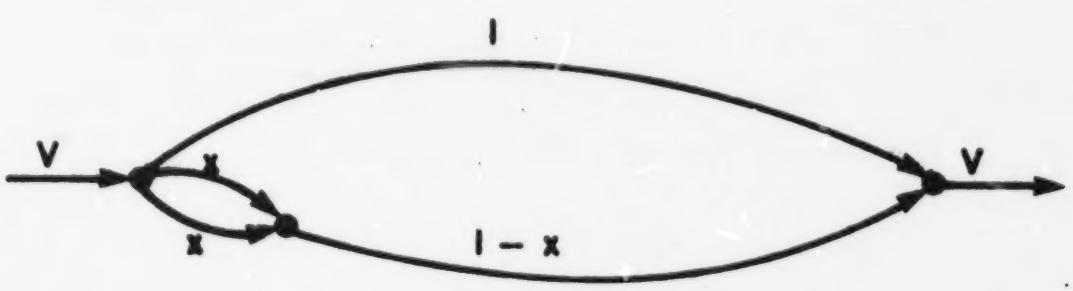


FIG. 3.2 – EFFET DE LA CODIFICATION DU RÉSEAU SUR L'AFFECTATION PROBABILISTE MULTICHEMIN

Il y a V déplacements entre O et D qui doivent se répartir entre les chemins possibles dont les coûts sont indiqués sur les liens. D'après l'algorithme de Dial, les trois chemins possibles, ayant le même coût, seront chargés avec V/3 déplacements. Il est cependant très probable que dans la réalité, surtout pour des valeurs de x proches de zéro, la charge soit à peu près V/2 pour le chemin d'en haut et V/2 pour l'ensemble des deux chemins d'en bas. Cela parce que ces deux chemins seront perçus (pour $x \to 0$) comme un seul.

Nous avons dit que le modèle de Dial peut être interprété aussi comme un modèle simple d'entropie. En effet, Fisk (1979) présente le problème suivant de minimisation avec des coûts (désutilités) variables sur les liens:

$$\text{Min} \sum_p \sum_q \sum_{k \in K_{pq}} h_{kpq} (\ell n\, h_{kpq} + \phi \sum_a \int_0^{V_a} S_a(x)\, dx) \qquad (3.11)$$

sujet à:

$$\sum_{k \in K_{pq}} h_{kpq} = g_{pq} \qquad \forall\ p,q \qquad (3.12)$$

$$V_a = \sum_p \sum_q \sum_{k \in K_{pq}} \delta_{akpq} \cdot h_{kpq} \qquad \forall\ a \qquad (3.13)$$

où p et q sont les zones d'origine et de destination.

$S_a(x)$ = coût sur l'arc "a" en fonction du flot "x" qui le traverse

V_a = flot sur l'arc "a"

$$\delta_{akpq} = \begin{cases} 1 & \text{si l'arc "a" fait partie du chemin k} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

K_{pq} = ensemble de chemins "efficaces" (déterminés d'avance) entre p et q.

g_{pq} = flot entre p et q.

Il est clair que si les coûts sur les arcs sont constants le problème défini par les équations (3.11), (3.12) et (3.13) devient:

$$\text{Min} \sum_p \sum_q \sum_{k \in K_{pq}} h_{kpq} \, (\ell n \, h_{kpq} + \phi \, S_{kpq}) \qquad (3.14)$$

sujet à:

$$\sum_{k \in K_{pq}} h_{kpq} - g_{pq} = 0 \qquad \forall \; p,q \qquad (3.15)$$

$$h_{kpq} \geq 0 \qquad (3.16)$$

En appliquant les conditions de Kuhn et Tucker, pour un h_{kpq}, au problème de minimisation donné par les expressions (3.14), (3.15) et (3.16) on obtient la probabilité P_{kpq} que le chemin k entre p et q soit emprunté:

$$P_{kpq} = \frac{h^*_{kpq}}{\sum_{j \in K_{pq}} h^*_{jpq}} = \frac{\exp(-\phi \, S_{kpq})}{\sum_{j \in K_{pq}} \exp(-\phi \, S_{jpq})} \quad \text{si} \quad k \in K_{pq} \qquad (3.17)$$

$$P_{kpq} = 0 \qquad \text{sinon}$$

Dans ce cas, l'interprétation du paramètre de diversion ϕ est très simple. En regardant l'expression (3.14) on voit que si ϕ est grand ($\phi \to \infty$) le problème équivaut à minimiser les coûts totaux, et le modèle devient un modèle du type tout ou rien. Par contre, si ϕ tend vers zéro, on minimise $-(-h_{kpq} \ln h_{kpq})$, ce qui équivaut à maximiser l'entropie sur les chemins possibles (chemins efficaces de Dial).

3.3 Le problème d'agrégation spatiale

L'incidence du problème d'agrégation spatiale (supposition que la population et les activités d'une zone sont concentrées en son centroïde) dans la qualité des résultats de l'étape d'affectation, est reconnue par plusieurs auteurs (voir par exemple Last et Leak 1976, Daganzo 1977, Sheffi 1978, Khelifi et Uhry 1978). C'est à l'étape de la modélisation des liens d'accès entre les centroïdes des zones et le réseau que ce problème a sa plus grande importance.

Etant donné qu'en réalité la population et les activités d'une zone ne sont pas concentrées dans les centroïdes, mais réparties en leur intérieur, la distance d'accès au réseau pour des usagers différents dépendra, entre autres, de leur localisation dans la zone. La variation des distances d'accès par rapport à la distance "moyenne" ou représentative de la population de la zone, sera en général d'autant plus grande que la taille de la zone s'accroît.

Dans le cas d'un transport en commun (où généralement l'accès au réseau se réalise à pied) cette variable est amplifiée parce que

normalement, une unité de temps de marche est perçue comme plus longue qu'une unité de temps des autres étapes d'un déplacement complet (des facteurs de 2 et 3 sont utilisés souvent pour convertir le temps de marche en unités de temps généralisé; le temps de parcours en véhicule étant considéré avec un facteur égal à 1).

L'exemple qui suit illustre le problème que nous venons de discuter.

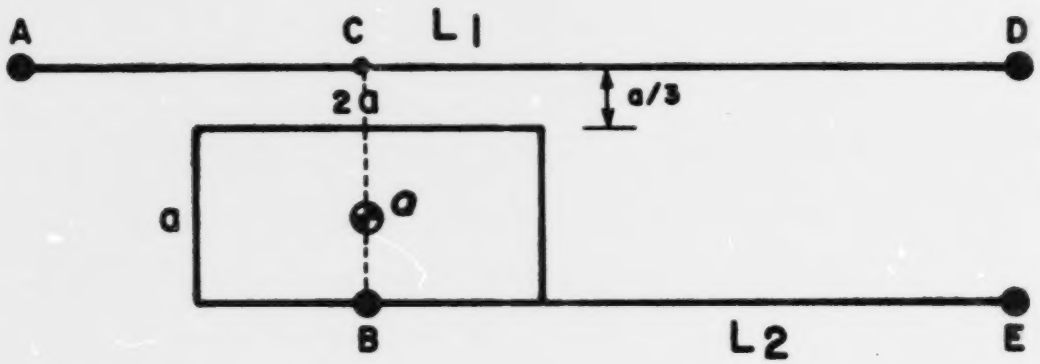
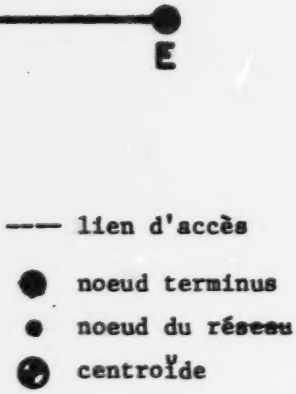


Figure 3.3 Exemple d'accès au réseau



Supposons que pour aller à une destination commune (centre-ville par exemple) la population de la zone O (zone rectangulaire de dimensions a et 2a) dispose de deux lignes (L_1 entre A et D et L_2 entre B et E) auxquelles les piétons peuvent accéder en n'importe quel point suivant un système de rues en grille. Lorsqu'on codifie le réseau, même

si la population de la zone a été considérée concentrée au centroïde O, les distances d'accès aux lignes L_1 et L_2 (d_1 et d_2) ne seront pas les distances géographiques $\overline{OB}$ et $\overline{OC}$. Pour essayer de corriger les erreurs introduites par l'agrégation spatiale, une distance "moyenne", généralement arbitraire, est calculée.

Dans notre exemple, étant donné les suppositions déjà faites, ces distances pourraient être (si la population était répartie uniformément dans la zone):

$$d_1 = \frac{2.5a}{3} \qquad d_2 = \frac{3a}{4}$$

Il est intéressant de noter que pour le modèle toute la population de la zone est censée avoir les mêmes distances d'accès d_1 et d_2 . Le tableau 3.1 présente pour des valeurs différentes de "a", les temps d'accès moyen, minimal et maximal aux lignes L_1 et L_2 pour la population de la zone. Des facteurs (F) de 2 et 3 sont utilisés pour convertir les temps d'accès en unités de temps généralisé. Une vitesse de marche de 3km/h a été supposée.

Les résultats montrent comment les temps d'accès perçus par des voyageurs habitant différents points de la zone peuvent être différents, et ce, dépendamment de la taille de la zone et des tracés des lignes spécifiques auxquelles la population a accès.

"a" (mètres)	TEMPS D'ACCÈS À LA LIGNE L_1 (min et sec)						TEMPS D'ACCÈS À LA LIGNE L_2 (min et sec)					
	F = 2			F = 3			F = 2			F = 3		
	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max	Moyenne	Min.	Max.
50	1'40"	0'40"	2'40"	2'30"	1'00"	4'00"	1'30"	0'00"	4'00"	2'15"	0'00"	6'00"
100	3'20"	1'20"	5'20"	5'00"	2'00"	8'00"	3'00"	0'00"	8'00"	4'30"	0'00"	12'00"
150	5'00"	2'00"	8'00"	7'30"	3'00"	12'00"	4'30"	0'00"	12'00"	6'45"	0'00"	18'00"
200	6'40	2'40"	10'40"	10'00"	4'00"	16'00"	6'00"	0'00"	16'00"	9'00"	0'00"	24'00"
250	8'20"	3'20"	13'20"	12'30"	5'00"	20'00"	7'30"	0'00"	20'00"	11'15"	0'00"	30'00"
300	10'00"	4'00"	16'00"	15'00"	6'00"	24'00"	9'00"	0'00"	24'00"	13'30"	0'00"	36'00"

Tableau 3.1 Illustration de la variabilité des temps d'accès pour l'exemple de la figure 3.3.

3.4 La diversion du flot entre deux zones: pourquoi se produit-elle ?

Lorsqu'on examine des déplacements complets (accès plus attente et parcours sur le réseau) on retrouve souvent que des individus se déplaçant entre la même paire de zones origine-destination utilisent des chemins différents. D'après ce que nous venons de présenter dans les sections 3.2 et 3.3 deux causes principalement pourraient provoquer cette diversion du flot. D'une part, on a dit que les utilités (désutilité, impédance ou coût généralisé de déplacement dans ce cas) des chemins disponibles pour la population, ne sont pas perçues de la même façon par tous les individus de cette population. D'autre part, il a été reconnu que les temps d'accès au réseau peuvent varier substantiellement pour des individus habitant dans des endroits différents de la zone en question.

Ces deux suppositions sont raisonnables, et il doit y avoir certainement des cas où la diversion s'explique par l'une ou l'autre (ou les deux). Mais,

- quelle est la cause principale du phénomène de diversion ?
- y en a-t-il une qui domine sur l'autre ?
- est-ce que les voyageurs sont vraiment incapables de percevoir correctement et de la même façon les temps de voyage des alternatives auxquelles ils font face ?
- Si oui, jusqu'à quel point cette perception différente pourra changer l'ordre des préférences des alternatives pour des individus différents ?

Une réponse à ces questions nous semble nécessaire pour se prononcer sur la qualité des modèles présentés dans le chapitre II et pour décider où il faudrait investir des efforts visant à améliorer la performance des modèles d'affectation sur un réseau de transport en commun.

Il est clair que les modèles d'affectation totale entre deux zones au chemin d'impédance minimale sont inadéquats. Pour le rejeter, il suffit de constater l'existence du phénomène de diversion. Il n'est pas clair, cependant, que ces modèles soient faibles à cause de leurs hypothèses sur le comportement des voyageurs. Il pourrait arriver que, même si la perception du temps varie d'individu à individu, cette variation ne soit pas suffisante pour faire changer l'ordre des alternatives pour des voyageurs différents. Dans ce cas, la diversion serait fort probablement due au problème d'agrégation spatiale, et des modèles tels que TRANSCOM et TRANSEPT, qui font la diversion tout en respectant le fait que sur le réseau de transport en commun, seulement les chemins d'impédance minimale sont chargés, présenteraient de nets avantages sur les autres. Le modèle du type tout ou rien entre zones et multichemin de Dial étant tous les deux également arbitraires.

Il y a plusieurs arguments raisonnables pour penser a priori que, au moins pendant les périodes de pointe, le comportement des voyageurs au niveau désagrégé, correspondant à celui qui a été supposé dans les modèles du type tout ou rien, et qu'en conséquence la cause principale de la diversion est le problème de l'agrégation

spatiale. Entre ces arguments nous citons:

a) La plupart des voyages réalisés pendant les heures de pointe correspondent à des déplacements habituels (but travail, étude). Dans ce cas, il semble raisonnable de supposer que les usagers aient une connaissance suffisante du réseau de transport en commun, au moins en ce qui concerne les alternatives pertinentes à leurs voyages habituels spécifiques.

b) Par rapport à la perception du temps de voyage, même si nous acceptons qu'en général les usagers ne peuvent pas percevoir le temps d'une façon exacte, nous croyons que la plupart d'entre eux peuvent le faire avec un degré d'approximation suffisant pour pouvoir décider correctement entre les alternatives auxquelles ils font face.

c) En pratique, dans la plupart des cas, les usagers du transport en commun font face à un nombre assez restreint d'alternatives. Une exception réside dans le cas des déplacements sur des artères comportant plusieurs lignes parallèles. Dans une telle situation le concept de chemin d'impédance minimale devient plus compliqué (voir par exemple Chriqui 1974), mais on peut supposer que n'importe laquelle des lignes communes (si elles sont du même mode) correspond au chemin le plus "court".

d) Dans les réseaux de transport en commun non congestionnés il peut y avoir occasionnellement des problèmes de capacité. Cependant dans les routes de plus grand achalandage exploitées jusqu'à la limite de capacité, en général l'opérateur répond rapidement en augmentant l'offre. Dans les réseaux fortement congestionnés la plupart des routes sont exploitées, pendant les périodes de pointe, à la limite (et en plusieurs cas au-dessus) de leur capacité. C'est pour cela que nous pensons que les problèmes de capacité ne devraient pas être une cause importante de la diversion, comme c'est le cas dans les réseaux routiers où la capacité dans le court et moyen terme est fixe.

Evidemment nous ne voulons pas transformer ces arguments qui nous semblent raisonnables en hypothèses avant de tester le comportement des usagers sur un réseau réel. Seulement après une analyse détaillée des déplacements (ceux des voyageurs de la période de pointe sur le réseau de Montréal en 1978) nous nous sentirons en mesure de formuler des hypothèses. Cette analyse, comme on l'a vu au chapitre I constitue un des objectifs de notre travail.

CHAPITRE IV

METHODOLOGIE

4.1 Introduction

La méthode de travail que nous avons choisie pour atteindre les objectifs mentionnés au chapitre I est centrée principalement sur l'analyse expérimentale du comportement des usagers du transport en commun. Pour ce faire, nous avons utilisé comme information de base les réponses des voyageurs lors de l'enquête réalisée à Montréal par la C.T.C.U.M. pendant l'automne 1978 et le réseau analytique codifié à cette occasion par la même entreprise.

En utilisant comme référence de comparaison des résultats des modèles d'affectation les réponses des voyageurs et non pas des indicateurs obtenus de l'observation du comportement réel du système (comptages par exemple), on résoud premièrement le problème dû aux erreurs issues de la matrice origine-destination de déplacements.

Après, lorsqu'on compare les itinéraires décrits sur le réseau de transport en commun (déduits des réponses de l'enquête) avec les itinéraires simulés, obtenus à l'aide d'un algorithme de calcul de chemins "les plus courts", les erreurs dues à l'agrégation spatiale sont isolées. La similitude des itinéraires décrits et les itinéraires simulés est alors une mesure de la qualité des hypothèses du modèle utilisé, concernant les comportements des voyageurs face au

choix de routes.

Enfin, l'importance de cette erreur étant connue, une comparaison des itinéraires décrits et des itinéraires simulés (les plus courts entre centroïdes des zones) pour différentes politiques d'accès au réseau, donne une mesure de l'importance des erreurs dues aux problèmes de l'accès et de l'agrégation spatiale.

Les résultats de cette analyse expérimentale et une révision détaillée de la littérature concernant le sujet nous permettent de proposer des hypothèses de base pour les modèles d'accès et de diversion ainsi que de suggérer une structure générale plus convenable pour un modèle d'affectation de réseaux de transport en commun. Après, nous retournons à la méthode empirique pour tester (dans les cas où existent les données nécessaires) quelques-uns de ces modèles.

La figure 4.1 résume d'une façon schématique les différentes étapes de notre démarche.

Les sections qui suivent donnent un aperçu de la méthodologie utilisée lors de l'analyse expérimentale sur le comportement des usagers du transport en commun à Montréal.

4.2 Quelques définitions

Dans cette section nous définissons certaines notions qui seront rencontrées souvent tout au long du texte qui suit.

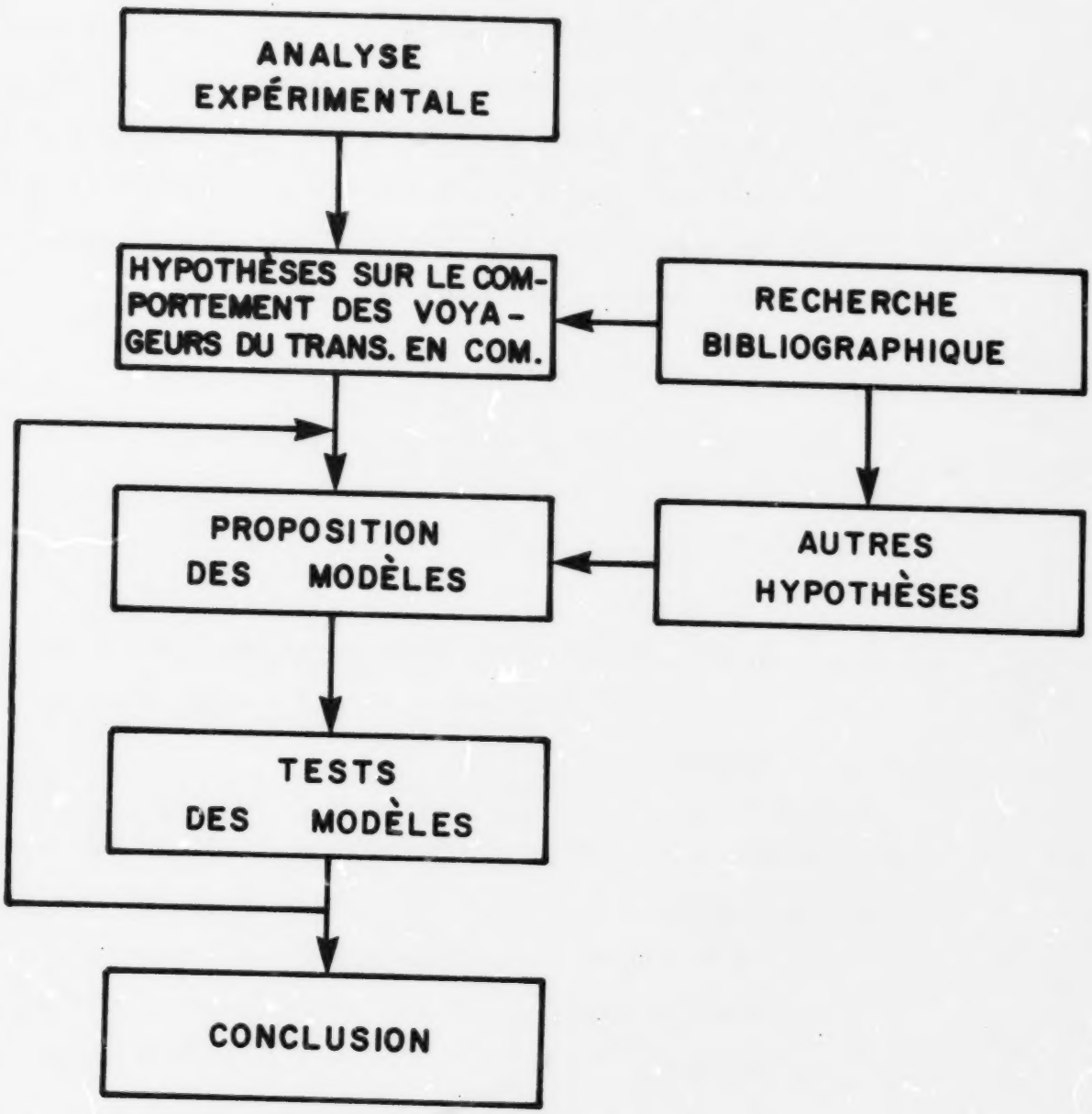


FIG. 4.1 – SCHÉMA DE LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

a) Réponse: correspond à la définition d'un déplacement en transport en commun tel que répondu par les usagers lors de la réalisation des enquêtes origine-destination de la C.T.C.U.M. En ce qui concerne l'itinéraire même, cette réponse contient: une zone d'origine O, une zone de destination D et l'ensemble des lignes empruntées, $L = \{\ell_1, \ell_2, \ell_3 \ldots \ell_p\}$, où p représente le nombre de lignes empruntées.

b) Itinéaire décrit: c'est l'itinéraire le plus probable (sur le réseau de transport en commun) obtenu à partir de la réponse des usagers. Il comprend l'information contenue dans la réponse, à laquelle on ajoute, au moyen d'une procédure de validation, l'ensemble $N = \{n_1, n_2 \ldots n_p, n_{p+1}\}$, où n_1 et n_{p+1} sont les noeuds d'accès au réseau (entrée et sortie) et les noeuds intermédiares $n_2, \ldots n_p$ sont les noeuds de correspondance.

c) Itinéaire simulé: c'est l'itinéraire obtenu à l'aide d'un algorithme (de calcul de chemin le plus court, en ce cas) avec le but de reproduire un itinéraire décrit. Il comporte alors, la zone d'origine O et la zone de destination D, l'ensemble de lignes $L^s = \{\ell_1^s, \ell_2^s \ldots \ell_q^s\}$ et l'ensemble de noeuds $N^s = \{n_1^s, n_2^s \ldots n_q^s, n_{q+1}^s\}$, où q représente le nombre de lignes empruntées.

d) Paire d'itinéaires: c'est le couple formé d'un itinéraire décrit et son itinéraire simulé correspondant.

e) Paire d'accès identique: une paire d'itinéraires sera dite d'accès identique si elle satisfait les deux conditions suivantes:

i) $n_1 = n_1^s$

ii) $n_{p+1} = n_{q+1}^s$

f) Paire d'accès différent: une paire d'itinéraires sera dite d'accès différent si elle ne satisfait pas une (ou les deux) des conditions précédentes.

g) Paire égale: une paire d'itinéraires sera considérée égale si les lignes utilisées dans l'itinéraire décrit et l'itinéraire simulé sont les mêmes.

i) $L = L^s$

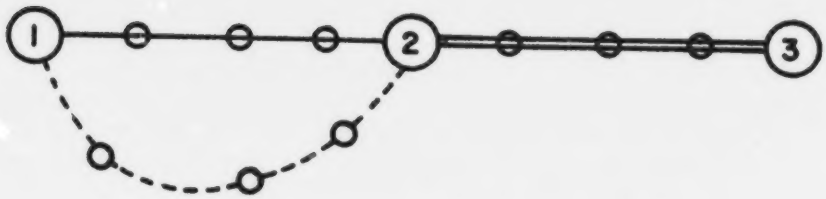
Cette définition reste la même tant pour les paires d'accès identique que pour celles d'accès différent.

h) Paire commune: la notion de paire d'itinéaires communs dépend du type d'accès du couple d'itinéraires. Si la paire est d'accès égal, elle sera commune si les deux conditions qui suivent sont satisfaites:

i) $L \neq L^s$

ii) $N = N^s$

La figure qui suit présente un exemple de ce type de paire.



Ligne 1

Ligne 2

Ligne 3

Noeuds d'accès ou de correspondance

Autres noeuds des lignes.

Itinéraire décrit: $N = \{1,2,3\}$

$L = \{1,2\}$

Itinéraire simulé: $N^s = \{1,2,3\}$

$L^s = \{3,2\}$

Dans cet exemple les lignes initiales des itinéraires décrits et simulés sont différentes, mais elles sont perçues par les usagers accédant au noeud 1 comme égales (lignes communes).

Si la paire est d'accès différent, la notion de paire commune change légèrement. Dans ce cas, les conditions suivantes doivent être satisfaites:

i) $L \neq L^s$

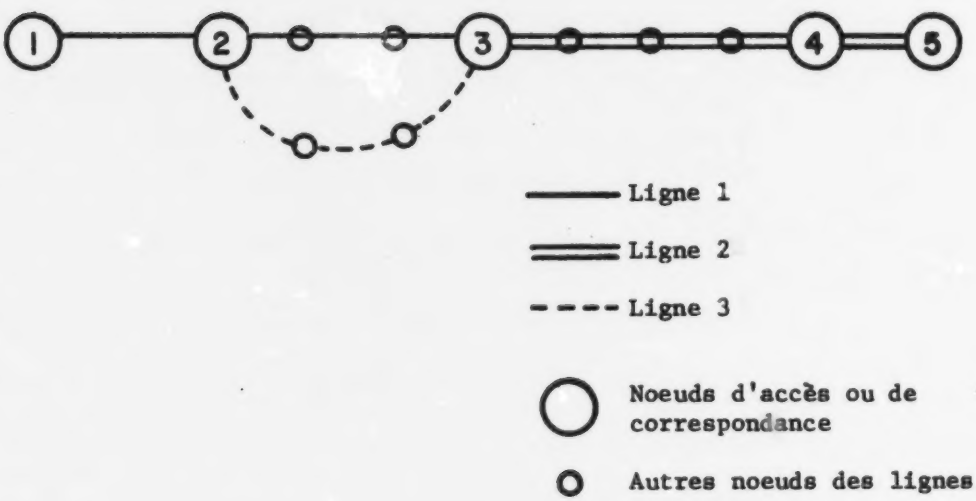
ii) $q = p$

iii) $n_j = n_j^s \qquad j = 2...p \qquad , \quad si \quad p > 2$

iv) ℓ_1 passe par n_1^s vers n_2^s

v) ℓ_p passe par n_{p+1}^s en venant de n_p^s

La figure qui suit présente un exemple de paire commune avec accès différent.



Itinéraire décrit: $N = \{1,3,5\}$

$L = \{1,2\}$

Itinéraire simulé: $N^s = \{2,3,4\}$

$L^s = \{3,2\}$

i) Paire différente: une paire d'itinéraires sera dite différente si elle n'est ni égale ni commune. Cette définition reste la même tant pour les paires d'accès identique que pour celles d'accès différent .

4.3 Etude sur le comportement des voyageurs

4.3.1 Information de base

Lorsqu'un voyageur du transport en commun se déplace entre deux points quelconques de la région desservie par un réseau donné, on distingue deux types de déplacements. D'une part, les déplacements d'accès ou "hors réseau" entre les centroïdes des zones d'origine ou de destination et les noeuds d'entrée ou de sortie du réseau, et d'autre part, le déplacement sur le réseau, entre les noeuds d'entrée et de sortie, comportant une ou plusieurs lignes de transport en commun.

L'étude du comportement des voyageurs face au choix des routes implique alors les données de base suivantes:

a) La description du réseau de transport en commun pour une période donnée de la journée.

b) Un système de zones obtenu du découpage de la région desservie par le réseau de transport en commun, et

c) Les déplacements origine-destination sous la forme d'une "réponse", tel que définie à la section 4.1.

Cette information de base fut mise à notre disposition par le Service de la Planification de la C.T.C.U.M. En ce qui concerne les méthodes suivies pour l'obtenir, Chapleau (1974) et Chriqui (1974) traitent en détail les deux premiers aspects. Les réponses des usagers ont été obtenues lors d'une enquête origine-destination de déplacements réalisée à Montréal en 1978 par la C.T.C.U.M. Comme on l'a déjà sou-

ligné, cette enquête (de même que les enquêtes effectuées en 1970 et 1974) a comme particularité qu'elle demande, pour les déplacements en transport en commun, les lignes empruntées pour se rendre de la zone d'origine à la zone de destination.

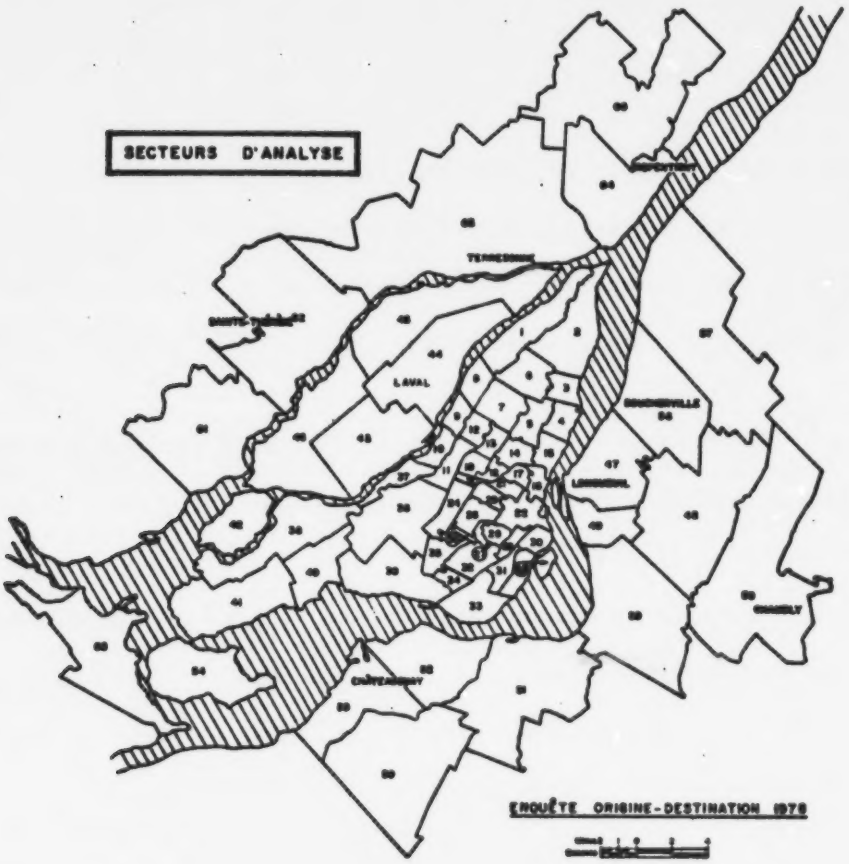
Pour donner une idée de la taille du problème à traiter, disons que la région d'étude (région de Montréal), dont un schéma est présenté à la figure 4.2, a été divisée en 1264 zones, que le réseau de la période de pointe du matin (5 A.M. à 9 A.M.), période de notre analyse, comporte quelques 134 lignes de transport en commun se déplaçant sur environ 981 noeuds, et que le nombre de réponses à analyser (pour la période de pointe du matin) est de 17.442.

4.3.2 Outils d'analyse

Pour rendre cette analyse possible, trois procédures informatiques ont dû être développées. Premièrement, une procédure de validation des réponses de l'enquête produit les itinéraires décrits (1). Une deuxième procédure crée pour chaque itinéraire décrit, un ou plusieurs (avec un maximum de cinq) itinéraires simulés. Ces itinéraires correspondent toujours aux chemins "les plus courts" entre l'origine et la destination choisies. Finalement, une troisième procédure

---

(1) Nous avons développé une version préliminaire avec l'aide très importante du Professeur R. Chapleau. Après, cette version a été reprogrammée et insérée dans l'ensemble de procédures du modèle TRANSCOM à la C.T.C.U.M. C'est finalement la procédure créée à la C.T.C.U.M. que nous avons utilisée lors de notre expérience. (Voir Bélanger, 1980 et De Cea, Chapleau et Trottier, 1982).



1 - MTL RIVIERE DES PRAIRIES
2 - MTL-EST PTE AUX TREMBLES
3 - MTL TETREAULTVILLE
4 - ST-JEAN-DE-DIEU
5 - MTL JARDIN BOTANIQUE
6 - ANJOU
7 - ST-LEONARD
8 - MONTREAL-NORD
9 - MONTREAL-NORD, MTL
10 - MTL AHUNTSIC
11 - MTL CREMAZIE
12 - MTL ST-MICHEL
13 - MTL ROSEMONT
14 - MTL PARC LAFONTAINE
15 - MTL MAISONNEUVE ROSEMONT
16 - MTL ST-JACQUES
17 - MTL DELORIMIER
18 - MTL BEAUDRY
19 - MTL VILLERAY
20 - MTL DE L'ACADIE
21 - MTL LAURIER
22 - MTL CENTRE
23 - OUTREMONT
24 - MOUNT ROYAL
25 - OUTREMONT, MTL
26 - HAMPSTEAD
27 - MTL SNOWDON
28 - WESTMOUNT
29 - MTL ST-HENRI
30 - MTL PTE. ST-CHARLES
31 - MTL PARC [illegible]
32 - MTL NDG
33 - LASALLE
34 - ST-PIERRE MTL-WEST
35 - COTE ST-LUC
36 - ST-LAURENT
37 - MTL SARAGUAY
38 - PIERREFONDS
39 - LACHINE DORVAL
40 - POINTE-CLAIRE
41 - KIRKLAND BEACONSFIELD
42 - ST-RAPHAEL-DE-L'ILE-BIZARD
43 - LAVAL (ST-FRANCOIS, AUTEUIL)
44 - LAVAL (VIMONT, SUVERNAY, ST-VINCENT)
45 - LAVAL (PONT-VIAU, CHOMEDEY)
46 - LAVAL (STE-ROSE, FABREVILLE, STE-DOROTHEE)
47 - LONGUEUIL
48 - ST-HUBERT, ST-BRUNO
49 - ST-LAMBERT, GREENFIELD PARK
50 - LAPRAIRIE, BROSSARD
51 - STE-CATHERINE, ST-CONSTANT
52 - CAUGHNAWAGA
53 - LERY, CHATEAUGUAY
54 - TERRASSE-VAUDREUIL, PINCOURT
55 - VERDUN
56 - BOUCHERVILLE
57 - VARENNES, STE-JULIE
58 - CHAMBLY, RICHELIEU
59 - MERCIER, ST-ISIDORE
60 - DORION, VAUDREUIL
61 - DEUX-MONTAGNES, ST-EUSTACHE
62 - BLAINVILLE, BOISBRIAND, STE-THERESE
63 - MASCOUCHE, TERREBONNE
64 - CHARLEMAGNE, REPENTIGNY
65 - L'EPIPHANIE, L'ASSOMPTION

FIG. 4.2 - SCHÉMA DE LA RÉGION D'ÉTUDE

est utilisée pour analyser en détail les itinéraires décrits et leurs itinéraires simulés respectifs.

On donne par la suite une très brève description de la fonction de ces procédures. Plus de détails se retrouvent dans Bélanger (1980) et De Cea, Chapleau et Trottier (1982).

4.3.2.1 Validation des réponses de l'enquête O-D

La fonction de la procédure de validation est la création des itinéraires décrits. A partir des réponses de l'enquête O-D, elle détermine le chemin à temps minimum pour se rendre de la zone d'origine à la zone de destination, en empruntant les lignes de transport en commun indiquées dans cette réponse.

Dans une première étape, la procédure débute la validation des réponses de l'enquête en considérant certaines conditions de rejets (voir Bélanger, 1980). Une fois la réponse acceptée, on passe à l'étape de la détermination de l'itinéraire "le plus probable". On choisit premièrement les noeuds d'entrée et de sortie du réseau. Ils correspondent, au préalable, aux noeuds appartenant à la première et dernière lignes empruntées les plus proches des centroïdes d'origine et de destination respectivement. Il peut arriver, cependant, qu'un deuxième noeud d'accès soit choisi (soit à l'origine, soit à la destination, ou les deux) pour remplacer le premier. Cette situation se produit, par exemple, si, entre les noeuds d'accès choisis aucun chemin n'existe, utilisant les lignes indiquées dans la réponse.

Finalement, les noeuds de correspondance des lignes sont trouvés au moyen d'un algorithme de calcul de chemin à temps minimum sur un réseau où seulement les noeuds des lignes du déplacement sont actifs. Il est clair que dans certains cas particuliers l'itinéraire décrit pourrait comporter un sous-ensemble de lignes répondues et même (ce qui est plus rare encore) une ligne pourrait être empruntée deux fois lors du déplacement. Des tests effectués à l'étape de développement du programme ont montré, pour les données de 1974, l'existence de 81 cas (sur 15.599 réponses analysées) semblables à ceux qu'on vient de décrire.

4.3.2.2 Génération des itinéraires simulés

La deuxième étape de l'étude du comportement de voyageurs face au choix de routes consiste fondamentalement à créer pour chaque itinéraire décrit les itinéraires simulés correspondants. Cette procédure de génération des itinéraires simulés produit un fichier ("fichier d'analyse") contenant l'information complète des itinéraires décrits (concernant les voyageurs et leurs déplacements), additionnée de l'information relative à un maximum de cinq itinéraires simulés. Lors d'une première simulation le programme lit les itinéraires décrits sur un fichier de base et produit un nouveau fichier où l'information concernant le premier itinéraire simulé a été ajoutée au fichier de base. Ce nouveau fichier devient l'entrée de la simulation suivante où les paramètres de la fonction d'impédance seront modifiés. En répétant cette procédure jusqu'à cinq fois, on obtient finalement le fichier d'analyse.

Après chaque simulation, en plus de produire les fichiers mentionnés, cette procédure produit des résultats de comparaison des itinéraires décrits et simulés.

4.3.2.3 Analyse des itinéraires décrits et simulés

Une troisième procédure permet d'étudier en détail les déplacements (itinéraires décrits et leurs itinéraires simulés respectifs) contenus dans le fichier d'analyse. La question à répondre est: comment les itinéraires décrits sont-ils reproduits par les simulations effectuées? Cette procédure donne la réponse à différents niveaux:

a) pour le total de déplacements analysés
b) pour différents regroupements spatiaux (secteurs de domicile des voyageurs)
c) pour différents groupes d'âge et de sexe des voyageurs
d) pour différents motifs (travail, études, magasinage, etc..) de déplacement
e) pour différents sous-modes de transport en commun (autobus, métro, métro-autobus) et
f) pour différentes longueurs de déplacement (la longueur étant représentée par le nombre de lignes empruntées dans l'itinéraire décrit).

4.3.3 La fonction d'impédance

4.3.3.1 Chemins entre noeuds du réseau

Lorsque l'analyse se concentre sur la partie des déplacements faits sur le réseau de transport en commun, la fonction d'impédance utilisée dans l'algorithme de calcul de chemins à temps (impédance) minimum contient uniquement des attributs relatifs aux chemins sur ce réseau (temps d'attente, pénalité d'emprunt d'une ligne, temps de parcours dans le véhicule). Etant donné un tarif fixe dans le cas particulier de notre étude, cette variable n'est pas représentée dans la fonction.

L'impédance ou coût généralisé, I, d'un chemin comportant q sections de ligne, a été supposée égale à la somme des temps de déplacement dans les véhicules (tv_j = temps de déplacement sur la ligne ℓ_j) et des temps hors véhicule (thv):

$$I = thv + \sum_{j=1}^{q} tv_j \qquad (4.1)$$

Si l'on dénote par i_j l'intervalle de la ligne ℓ_j et par p_j la pénalité d'emprunt de cette ligne, le temps hors véhicule est défini par l'expression qui suit:

$$thv = \sum_{j=1}^{q} (\min\{\max (a_1, a_2 i_j),\ a_3\} a_4 + p_j) \qquad (4.2)$$

où:

a_1 = temps minimal d'attente

a_2 = facteur multiplicatif de l'intervalle pour représenter le temps d'attente.

a_3 = temps maximal d'attente

a_4 = pondération du temps d'attente par rapport au temps dans le véhicule.

L'impédance totale d'un déplacement de q sections de ligne sera donc:

$$I = \sum_{j=1}^{q} (tv_j + \min\{\max(a_1, a_2 i_j), a_3\} a_4 + p_j) \qquad (4.3)$$

Dans le cas où $a_1 = 0$ et $a_3 = \infty$ cette expression devient:

$$I = \sum_{j=1}^{q} (tv_j + a_2 . a_4 . i_j + p_j) \qquad (4.4)$$

4.3.3.2 Chemins entre centroïdes

Lorsque le calcul des chemins à impédance minimale se fait entre les centroïdes des zones, on ajoute à la fonction d'impédance présentée à la section précédente un terme qui représente le temps d'accès (entrée et sortie du réseau). Ainsi, si ta_o et ta_d sont les temps d'accès à l'origine et à la destination respectivement, et a_5 est un paramètre représentant le poids du temps d'accès par rapport au temps de voyage dans le véhicule, la fonction d'impédance I' (temps généralisé de voyage entre centroïdes) devient:

$$I' = I + (ta_o + ta_d)\, a_5 \qquad (4.5)$$

ou bien:

$$I' = \sum_{j=1}^{q} (tv_j + \min \{\max(a_1, a_2 i_j),\ a_3\}\ a_4 + p_j) + (ta_o + ta_d)a_5 \quad (4.6)$$

4.3.4 Calibration de l'algorithme de calcul de chemins

L'ajustement des paramètres des fonctions d'impédance (I et I') de l'algorithme de cheminement utilisé a été fait par comparaison des itinéraires décrits et simulés. Au lieu de minimiser les différences entre certains indicateurs globaux, simulés et mesurés, notre méthode choisit, d'un ensemble défini de fonctions d'impédance, celle qui maximise le nombre de coïncidences entre les itinéraires décrits et simulés.

Dans une première étape on estime les paramètres de l'impédance sur le réseau de transport en commun, en utilisant une procédure comme celle indiquée dans la figure 4.3. Une fois choisis les paramètres de cette fonction, une procédure semblable est utilisée pour estimer la valeur du paramètre de pondération du temps d'accès. Dans ce cas, pour chaque itinéraire décrit on obtient la "partie réseau" de l'itinéraire d'impédance minimale entre centroïdes des zones. Un processus itératif est déclenché où seul le paramètre de pondération du temps d'accès est modifié. Il est arrêté lorsque toutes les valeurs prévues pour le paramètre de pondération du temps d'accès ont été examinées.

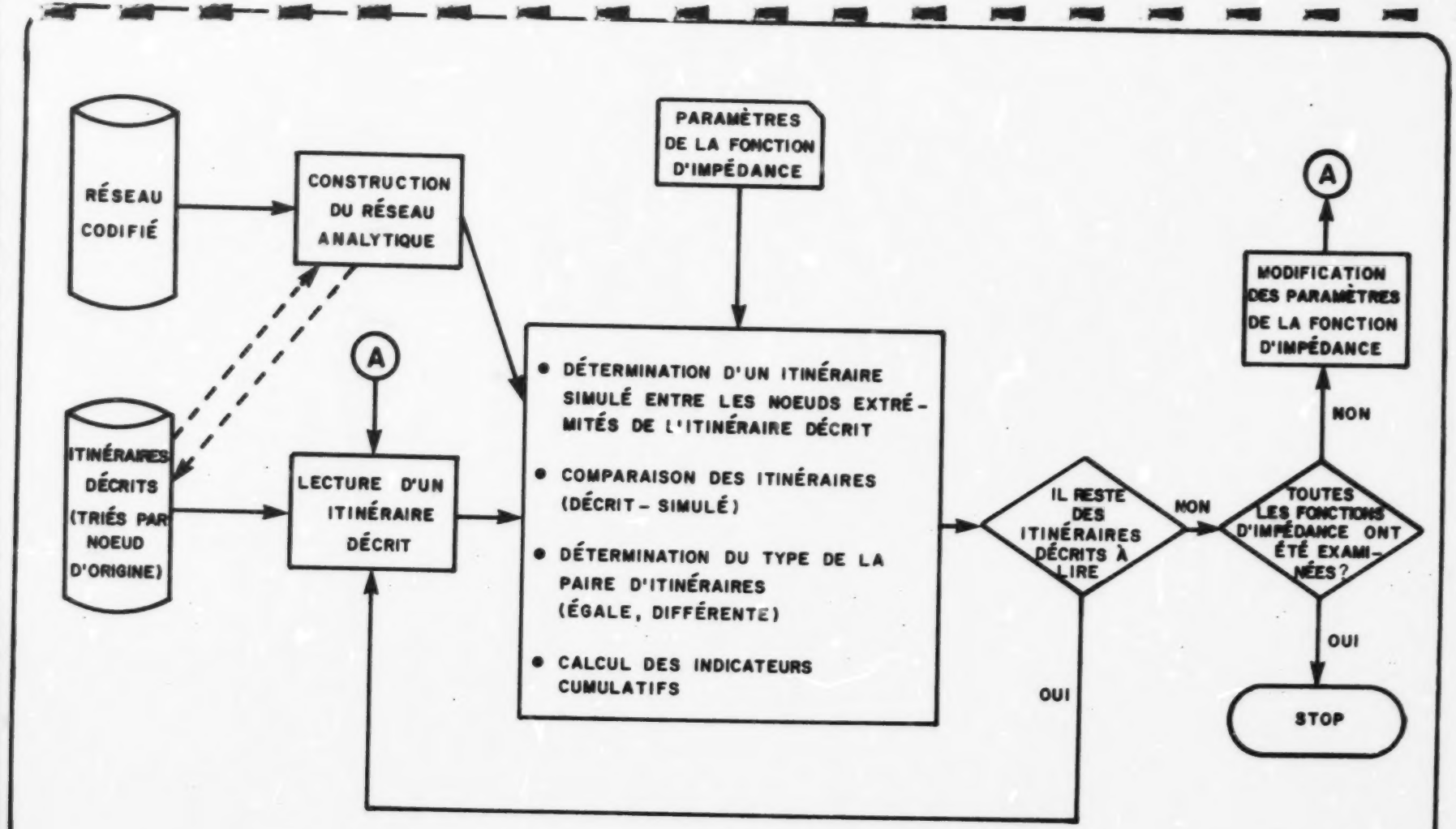


FIG. 4.3 – CALIBRATION D'UN MODÈLE D'AFFECTATION PAR L'ANALYSE DÉSAGRÉGÉE DES ITINÉRAIRES DÉCRITS ET SIMULÉS

CHAPITRE V

ANALYSE EXPERIMENTALE

5.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats les plus importants des analyses de comparaison d'itinéraires (décrits et simulés), qui utilisent les données de l'enquête O-D réalisée à Montréal en 1978, par la CTCUM. La période étudiée correspond à la période de pointe du matin, comportant environ 17400 itinéraires individuels effectués sur le réseau de transport en commun.

Tout itinéraire décrit, défini par:

- Sa zone d'origine — o
- Sa zone de destination — d
- L'ensemble des lignes empruntés (p lignes) — $L = \{\ell_1, \ell_2, \ldots \ell_p\}$ et
- L'ensemble des noeuds — $N = \{n_1, n_2 \ldots n_p, n_{p+1}\}$,

sera comparé avec trois types différents d'itinéraires simulés:

- Itinéraire simulé de type 1: qui correspond au chemin d'impédance minimale entre les noeuds n_1 et n_{p+1}
- Itinéraire simulé de type 2: qui correspond au chemin d'impédance minimale entre les noeuds les plus proches des centroïdes des zones o et d respectivement.

- Itinéraire simulé de type 3: qui correspond au chemin d'impédance minimale entre les centroïdes des zones o et d. Un module d'accès qui sera brièvement décrit à la section 5.4 a été utilisé dans ce cas pour créer les liens entre les centroïdes et les noeuds du réseau.

L'analyse de comparaison d'itinéraires décrits et simulés du type 1 (comparaison de type 1) a comme objectif principal la calibration de la fonction d'impédance et l'étude du comportement des voyageurs face au choix d'itinéraires. Par ailleurs, les comparaisons des itinéraires décrits et simulés de type 2 et 3 (comparaisons de type 2 et 3) cherchent à mesurer l'impact du problème d'agrégation spatiale (et conséquemment du problème de l'accès au réseau), sur la qualité des résultats du modèle d'affectation.

Les résultats de chaque type de comparaison sont présentés et analysés à différents niveaux d'agrégation. Enfin, des indicateurs concernant les itinéraires décrits et les trois types d'itinéraires simulés sont regardés ensemble afin d'en tirer certaines conclusions qui nous permettront d'établir les hypothèses du modèle d'affectation présenté au chapitre VI.

5.2 Analyse de comparaison de type 1

5.2.1 Calibration de la fonction d'impédance

5.2.1.1 Les paramètres de la fonction d'impédance

Le tableau 5.1 contient les paramètres de la partie hors véhicule des cinq fonctions d'impédance utilisées dans cette analyse. Lors des comparaisons préliminaires, d'autres ensembles de paramètres ont été testés. Nous avons retenu les cinq qu'on indique, soit parce qu'ils ont été les meilleurs (cas des fonctions 1,2 et 5) soit parce que, malgré qu'ils se soient avérés mauvais, ils demeurent souvent utilisés dans des études pratiques (cas des fonctions 3 et 4).

Tableau 5.1 Paramètres de la fonction d'impédance (hors véhicule)

Numéro de la fonction	a_1 (min)	a_2	a_3 (min)	a_4	p_j	Temps hors véhicule (q lignes empruntées)
1	0	0.5	30 (1)	1	5	$\sum_{j=1}^{q} (i_j/2 + 5)$
2	0	0.5	30	2	5	$\sum_{j=1}^{q} (i_j + 5)$
3	0	0.5	30	2	0	$\sum_{j=1}^{q} (i_j)$
4	0	0.5	30	1	0	$\sum_{j=1}^{q} (i_j/2)$
5	0	1.0	15	1	5 (2)	$\sum_{j=1}^{q} (\min(\max[2, i_j], 15) + p_j)$

(1) L'intervalle maximum sur le réseau à l'étude est de 30 min. La fonction d'impédance (expression 4.3) n'est jamais tronquée.

(2) p_j = 2.5 min si la ligne ℓ_j est une ligne de métro.

5.2.1.2 Comparaison désagrégée d'itinéraires décrits et simulés

a) Statistiques

Le tableau 5.2 contient le résumé des comparaisons (itinéraire par itinéraire) des itinéraires décrits et simulés. Les indicateurs suivants sont présentés:

ITEG = nombre de paires égales

ITCO = nombre de paires communes

ITDI = nombre de paires différentes

$\bar{X}(|V|)$ = valeur moyenne des valeurs absolues de la variable V

S(V) = déviation standard de la variable V

$r^2(V,W)$ = coefficient de corrélation (au carré) entre les variables V et W.

Les variables qui suivent ont été impliquées dans les calculs des indicateurs présentés:

TDS = temps total de déplacement de l'itinéraire simulé

TDD = temps total de déplacement de l'itinéraire décrit

THVS = temps hors véhicule de l'itinéraire simulé

THVD = temps hors véhicule de l'itinéraire décrit.

L'analyse du tableau 5.2 permet de faire les constations suivantes:

- Le pourcentage de coïncidences entre les itinéraires décrits et simulés est élevé pour les cinq comparaisons effectuées. En effet, la proportion de paires différentes varie entre 19.8% et

Tableau 5.2 Résultats des comparaisons (type 1) entre itinéraires décrits et simulés

Temps hors véhicule (Réseau)	# et % ITEG	# et % ITCO	# et % ITDI	$\bar{X}(\lvert TDS-TAD \rvert)$ (min)	S(TDS-TAD) (min)	r^2(TDS,TAD)	$\bar{X}(\lvert THVS-THVD \rvert)$ (min)	S(THVS-THVD) (min)	r^2(THVS,THVD)
$\sum_{j=1}^{q} (i_j/2+5)$	12447 (71.36)	1474 (8.45)	3521 (20.19)	1.40	4.20	0.9409	0.76	2.30	0.8281
$\sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$	12623 (72.37)	1330 (7.63)	3489 (20.00)	1.70	4.70	0.9216	1.10	3.10	0.8281
$\sum_{j=1}^{q} i_j$	11735 (67.28)	1319 (7.56)	4388 (25.16)	1.70	4.30	0.9216	0.83	2.30	0.7056
$\sum_{j=1}^{q} i_j/2$	10786 (61.86)	1354 (7.77)	5296 (30.37)	1.60	4.00	0.9216	0.50	1.40	0.5929
$\sum_{j=1}^{q} (\min(\max[2,i_j],15)+p_j)$ (1)	12634 (72.46)	1350 (7.74)	3452 (19.80)	1.70	4.70	0.9216	1.00	2.90	0.8281

(1) p_j = 5 min si ℓ_j est une ligne de surface, 2.5 min si elle est une ligne de métro.

30.37%. Il est important de remarquer que cette proportion est très similaire (environ 20%) pour les trois simulations (1,2 et 5) où la fonction d'impédance considère une pénalité fixe, associée à l'emprunt d'une ligne. Ces résultats changent, cependant, d'une façon importante pour les simulations (3 et 4) où le temps hors véhicule est supposé un multiple de la somme des intervalles des lignes empruntées. Etant donné qu'une telle modélisation du temps hors véhicule est assez utilisée, nous ferons mention, souvent, dans les étapes suivantes de notre analyse aux résultats obtenus pour la fonction d'impédance numéro 4 (THVS = $\sum_{j=1}^{q} i_j/2$).

- Il existe une forte corrélation entre les temps totaux de déplacement (décrit et simulé). Pour les cinq simulations les coefficients r^2 se situent entre 0.92 et 0.94. Lorsqu'on considère seulement les temps hors véhicule, ils tombent jusqu'à 0.70 et 0.59 pour les simulations 3 et 4. Cela peut être dû au fait que le nombre de paires d'itinéraires dont la quantité de sections de lignes empruntées est différente ($q-p \neq 0$) est sensiblement plus grand pour les simulations 3 et 4 (voir tableau 5.3).

b) Les paires différentes

Le nombre de paires différentes reflète d'une certaine façon le niveau de non-concordance existant entre le vrai comportement des usagers du transport en commun et celui supposé par le modèle. Cela explique notre intérêt d'étudier plus en détail les causes de ces

Tableau 5.3 Différence entre le nombre de sections de lignes empruntées dans les itinéraires simulés et décrits (q - p)

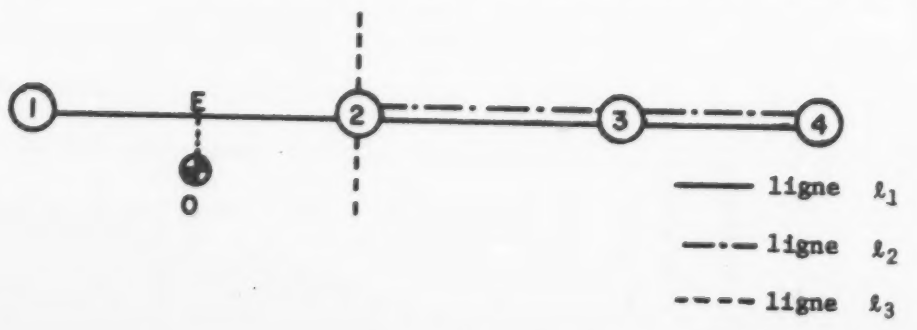
Numéro de la simulation	(q - p)							
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	2	51	1021	15779	563	26	0	0
2	2	52	1091	15834	457	6	0	0
3	0	39	680	14819	1612	273	18	1
4	0	29	569	13775	2249	685	119	10
5	2	44	916	15782	658	33	1	0

différences.

Une analyse poussée des paires différentes (environ 20% pour les simulations 1,2 et 5) indique que dans un nombre de cas assez important la différence entre l'itinéraire décrit et simulé peut être due à un problème d'accès, plutôt qu'à une perception "incorrecte" du chemin d'impédance minimale.

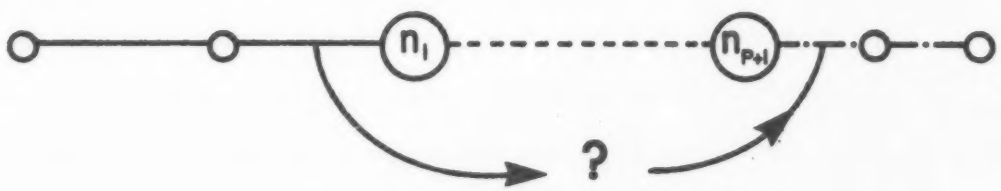
Lorsqu'on codifie le réseau de transport en commun, seulement les points importants (terminus des lignes, stations de métro, points de correspondance entre lignes) sont retenus comme des noeuds d'entrée ou de sortie du réseau. Dû à cette simplification nécessaire et au choix des points d'entrée et sortie du réseau pour les itinéraires simulés, ces derniers peuvent comporter des lignes (initiale, finale ou les deux) auxquelles l'usager en réalité n'a pas accès.

Dans une situation comme celle illustrée dans l'exemple qui suit, un usager de la zone o, empruntant la ligne ℓ_1, sera supposé être entré au réseau au noeud (2). Cependant, étant donné la longueur du lien, il est possible qu'il ait emprunté ℓ_1 à un arrêt entre les noeuds (1) et (2) (le point E par exemple). Si sa destination est le noeud (4), l'itinéraire simulé entre (2) et (4) ne comporterait pas nécessairement la même ligne ℓ_1 et la paire pourrait être différente.



Des situations comme la précédente se présentent souvent dans la périphérie de la région d'étude où normalement le réseau est beaucoup moins dense et les liens sont plus longs.

Afin de mesurer l'impact de ce problème sur les résultats présentés au tableau 5.2 nous avons comparé les itinéraires décrits avec une nouvelle sorte d'itinéraires simulés, illustrée par la suite.



ITINÉRAIRE SIMULÉ

ℓ_1 = première ligne de l'itinéraire décrit

ℓ_p = dernière ligne de l'itinéraire décrit

n_1 = premier noeud de l'itinéraire décrit

n_{p+1} = dernier noeud de l'itinéraire décrit

En traitant des itinéraires simulés avec accès à des liens, les exceptions suivantes, pour des raisons évidentes, ont été considérées:

- Si n_1 est un terminus de ℓ_1, n_1 reste le noeud initial de l'itinéraire simulé (même chose pour n_{p+1}).
- Si ℓ_1 est une ligne de métro, n_1 reste le noeud initial de l'itinéraire simulé (même chose pour ℓ_p).

Les 3489 itinéraires décrits non reproduits lors de la simulation numéro 2 (retenue comme la meilleure après l'analyse des indicateurs globaux et désagrégés) ont été comparés avec les nouveaux itinéraires simulés. Les résultats ont été les suivants:

- Paires différentes (même accès): 120 (3.5%)
- Paires différentes (accès différent): 2007 (57.5%)
- Paires égales (accès différent): 1247 (35.7%)
- Paires communes (accès différent): 115 (3.3%)

En conséquence, 61% des paires différentes restent différentes. Cependant le 39% des cas restants (paires égales et communes) l'itinéraire décrit peut être reproduit avec un accès correct. Cela veut dire que, sur le total d'itinéraires analysés, moins de 12% des paires restent différentes, dues possiblement à une perception incorrecte des coûts généralisés des alternatives disponibles aux usagers. Cette proportion de 12% demeure une borne supérieure parce qu'il est possible qu'une partie non négligeable de ces paires différentes soit due à des erreurs de codification (1) ou à des réponses incorrectes qui ont réussi à passer le filtre de la validation normale.

5.2.1.3 Les indicateurs globaux

Le tableau 5.4 résume certains indicateurs globaux concernant l'utilisation du réseau, obtenus lors du chargement des itiné-

---

(1) Plusieurs cas ont été détectés lors d'une inspection visuelle de paires différentes.

Tableau 5.4 Indicateurs globaux obtenus du chargement sur le réseau des itinéraires décrits et simulés (type 1) (itinéraires décrits = indice 100).

Itinéraires chargés	Sections/déplac.	Passagers métro	Sections métro	Correspondances métro-métro	Sections autobus
Décrits	1.917 (100)	160 857 (100)	211 402 (100)	50 545 (100)	419 013 (100)
Simulés 1 $(THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j/2+5))$	1.888 (98)	163 516 (102)	206 687 (98)	43 171 (85)	414 166 (99)
Simulés 2 $THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j+5))$	1.875 (98)	162 592 (101)	205 578 (97)	42 586 (84)	411 412 (98)
Simulés 3 $(THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j))$	1.998 (104)	176 605 (110)	226 659 (107)	50 054 (99)	430 366 (103)
Simulés 4 $(THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j/2))$	2.110 (110)	182 735 (114)	235 882 (112)	53 147 (105)	457 958 (109)
Simulés 5 $(THVS=\sum_{j=1}^{q}(\min(\max[2,i_j],15)+P_j))$	1.901 (99)	170 664 (106)	218 210 (103)	47 546 (94)	406 923 (97)

raires décrits et simulés (1). Comme dans le cas précédent, les commentaires les plus importants portent sur la valeur de la pénalité p_j dans la fonction d'impédance.

- Lorsque la pénalité p_j n'existe pas (simulations 3 et 4), le nombre moyen de sections empruntées par déplacement est surestimé (jusqu'à 10% dans le cas de la simulation 4).

- Cette surestimation est plus marquée dans le cas des lignes les plus rapides et à faible intervalle. Cela est le cas des lignes de métro. Comme l'indique le tableau 5.4 le nombre de passagers sur le métro est surestimé de 10% et de 14% pour les simulations 3 et 4 respectivement. La simulation 5, qui restait la meilleure au niveau du pourcentage de paires égales d'itinéraires décrits et simulés, surestime elle aussi le nombre de passagers sur le métro d'environ 6%, dû au fait que la pénalité pour ce mode a été supposée comme la moitié de celle des lignes de surface.

- Un problème spécial se pose quant à la simulation des correspondances métro-métro. Il semble évident qu'une correspondance de ce type doit être perçue par les voyageurs d'une façon différente des autres correspondances.Les liens de correspondance n'étant pas codifiés explicitement, le modèle dans sa version actuelle ne permet pas

---

(1) Un facteur d'expansion de 18.86 a été utilisé.

la modélisation de cette différence. Les simulations 3 et 4 "corrigent" un peu ce problème, mais non pas grâce à une meilleure reproduction des itinéraires décrits, mais plutôt à cause d'une surestimation de l'utilisation du métro où des itinéraires "incorrects" passent par le bon endroit. Ainsi, par exemple, pour la simulation 4, 18% des itinéraires simulés utilisant la ligne 1 du métro et 20% des itinéraires simulés utilisant la ligne 2 correspondent à des itinéraires décrits qui n'utilisent pas ces lignes.

5.2.1.4 Les indicateurs d'agrégation moyenne

La liste qui suit définit les variables qui seront l'objet des comparaisons contenues dans cette section (1):

ACHDE = achalandage des lignes lors du chargement des itinéraires décrits.

ACHSTP1 = achalandage des lignes lors du chargement des itinéraires simulés de type 1 (2).

CMXDE = passagers transportés par ligne au lien de charge maximale (ℓ_1) lors du chargement des itinéraires décrits.

CMXSTP1 = passagers transportés par ligne au lien ℓ_1 lors du chargement des itinéraires simulés de type 1.

---

(1) Cette même notation sera gardée lors des comparaisons de type 2 et 3. Seulement le chiffre 1 contenu dans certaines variables changera à 2 ou 3 selon le cas.

(2) Si aucune mention spéciale n'est faite, les itinéraires simulés de type 1 sont ceux qu'on obtient avec la deuxième fonction d'impédance

$$(THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j+5))$$

ENTDE = passagers entrant aux stations de métro lors du chargement des itinéraires décrits.

ENTSTP1 = passagers entrant aux stations de métro lors du chargement de itinéraires simulés de type 1.

SORDE = passagers sortant des stations de métro lors du chargement des itinéraires décrits.

SORSTP1 = passagers sortant des stations de métro lors du chargement des itinéraires simulés de type 1.

ACHDI1 = ACHDE - ACHSTP1

CMXDI1 = CMXDE - CMXSTP1

ENTDI1 = ENTDE - ENTSTP1

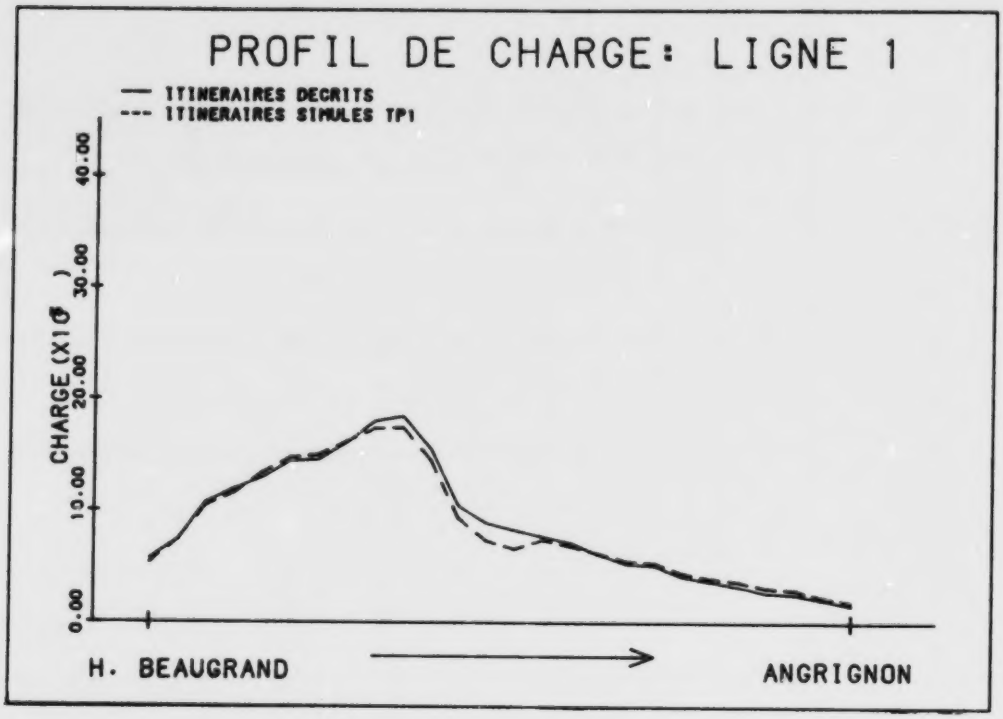
SORDI1 = SORDE - SORSTP1

Le tableau 5.5 présente certains indicateurs statistiques concernant les variables définies. Les figures 5.1 à 5.4 illustrent (pour les itinéraires décrits et simulés) les profils de charge de deux lignes de métro et la distribution de la distance de voyage sur le réseau. On constate:

- Une très bonne calibration du modèle pour la simulation type 1 avec la deuxième fonction d'impédance (THVS = $\sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$). Les coefficients r^2 pour toutes les variables choisies sont supérieures à 0.90 (voir tableau 5.5), tandis que les profils de charge des lignes 1 et 2 du métro (fig. 5.1 et 5.2) et l'histogramme de distribution de la distance de voyage (fig. 5.4) sont très proches pour les deux types d'itinéraires.

Tableau 5.5 Statistiques de comparaison d'itinéraires décrits et simulés de type 1.
(Niveau d'agrégation moyen)

Variables (ou paires de variables)	Comparaison de type 1 ($THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j + 5)$)			Comparaison de type 1 ($THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j/2)$)		
	$\bar{X}$	S	r^2	$\bar{X}$	S	r^2
(ACHDI1/ACHDE) * 100	8.85	37.32	-	-2.34	59.24	-
(CMXDI1/CMXDE) * 100	12.67	34.51	-	14.76	61.35	-
(ENDIF1/ENTDE) * 100	7.98	25.68	-	-22.55	46.33	-
(SODIF1/SORDE) * 100	-2.45	15.36	-	-23.68	40.93	-
(ACHDE,ACHSTP1)	-	-	0.9004	-	-	0.7687
(CMXDE,CMXSTP1)	-	-	0.9088	-	-	0.7873
(ENTDE,ENTSTP1)	-	-	0.9893	-	-	0.9482
(SORDE,SORSTP1)	-	-	0.9939	-	-	0.9771



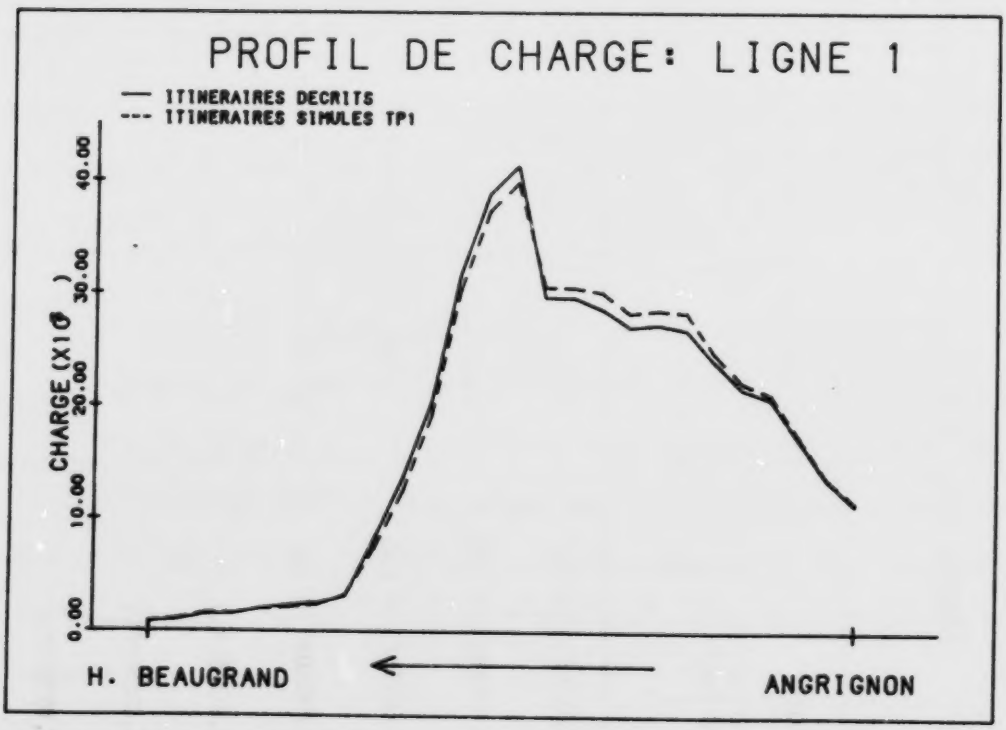
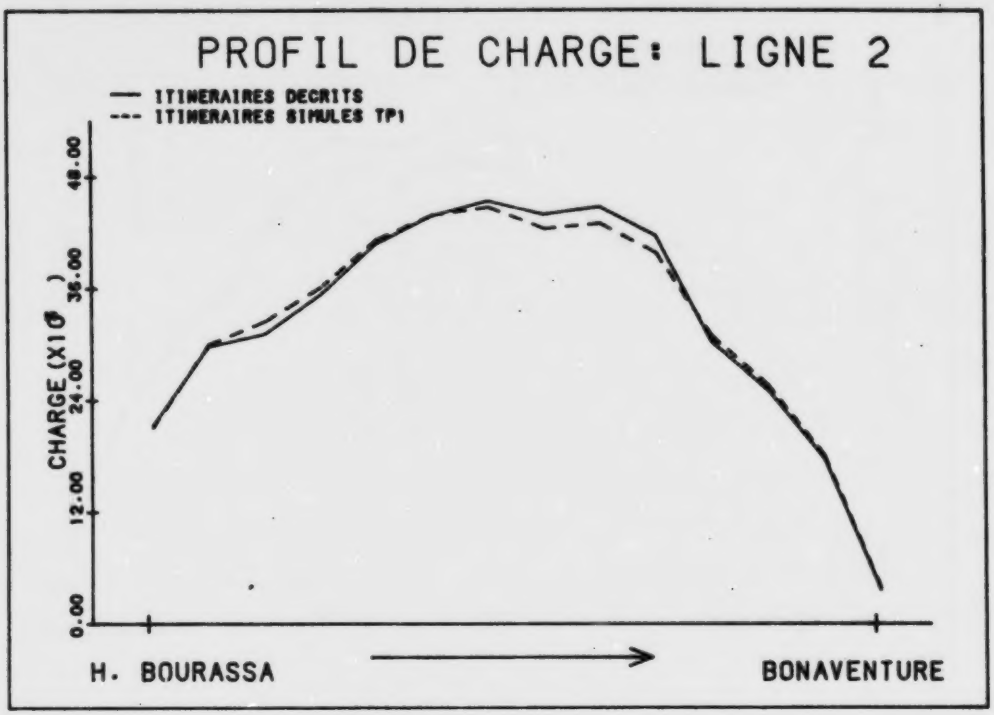


Figure 5.1 Profils de charge: ligne 1 du métro (comparaison de type 1)



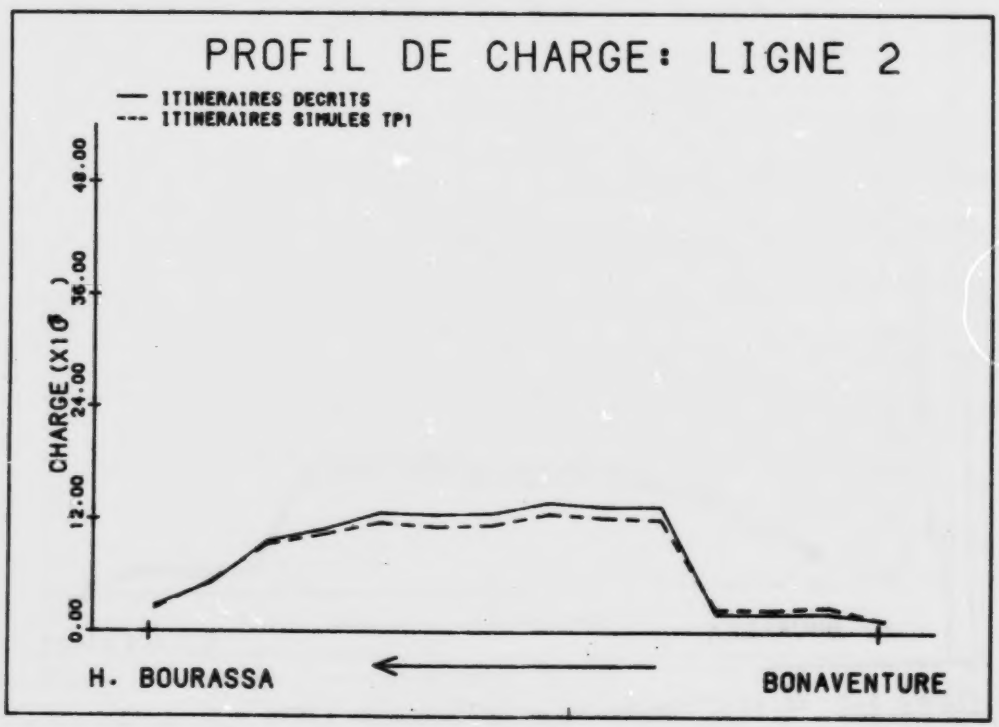
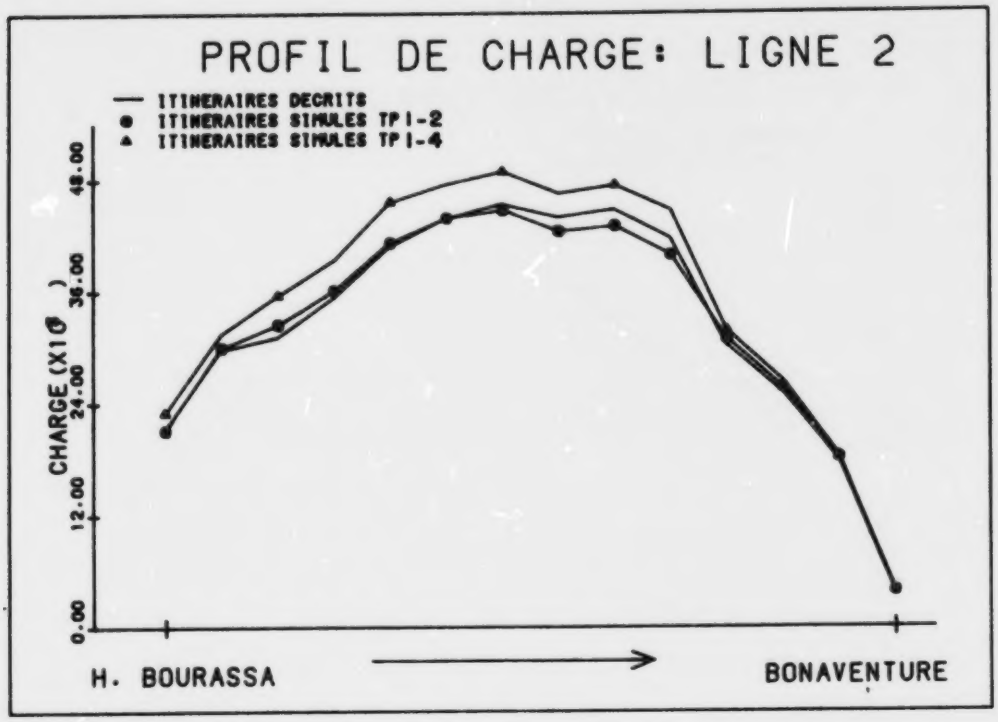


Figure 5.2 Profils de charge: ligne 2 du métro (comparaison de type 1)



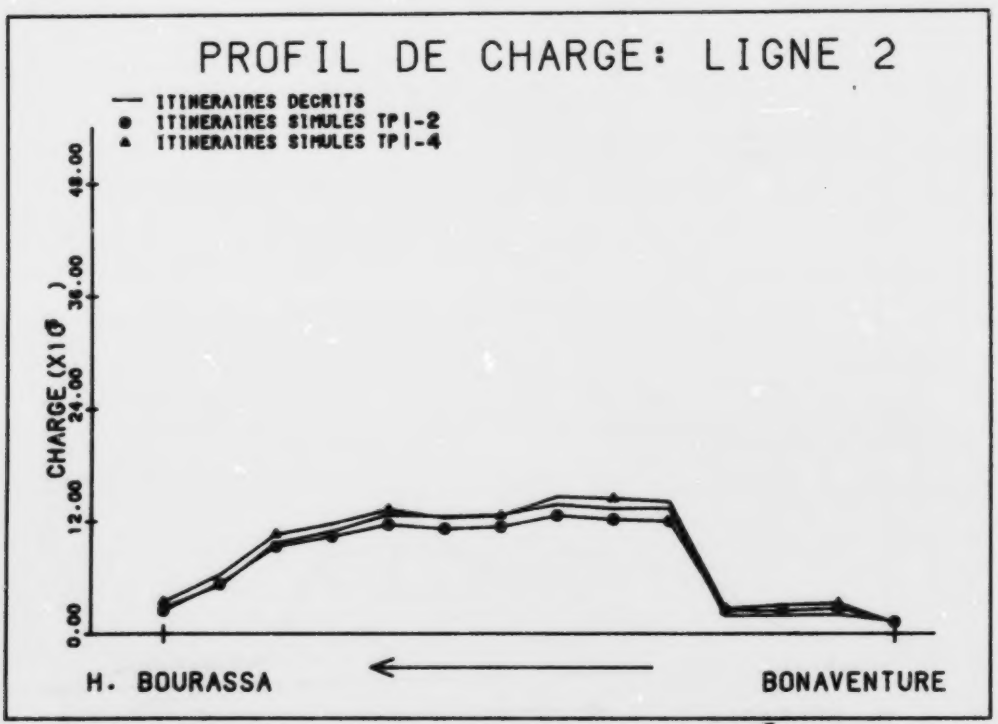
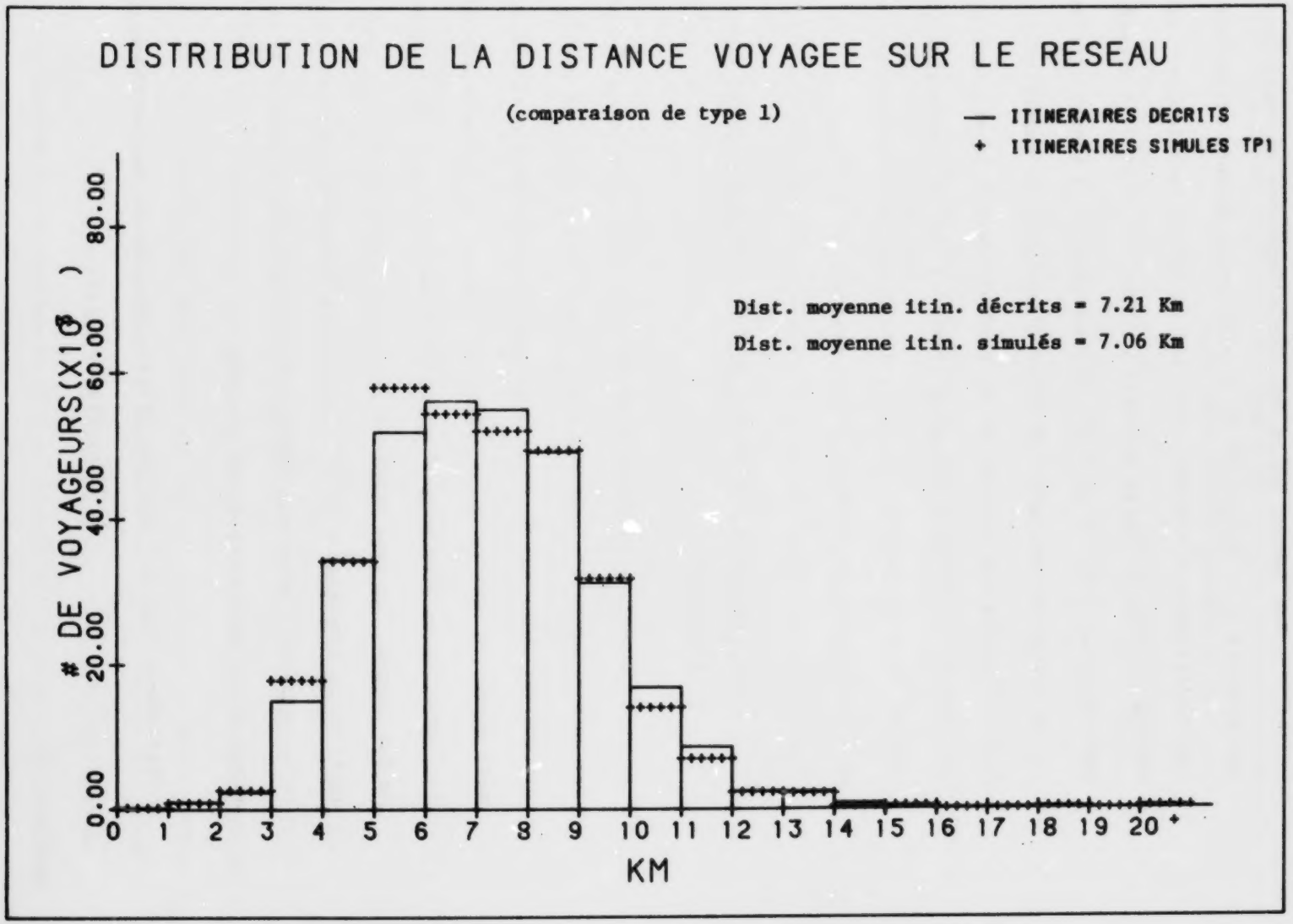


Figure 5.3 Effet d'une mauvaise calibration (THVS = $\sum_{j=1}^{q} i_j/2$)

sur les profils de charge de la ligne 2 du métro
(comparaison de type 1)

Figure 5.4


DISTRIBUTION DE LA DISTANCE VOYAGEE SUR LE RESEAU
(comparaison de type 1)
ITINERAIRES DECRITS
ITINERAIRES SIMULES TP1
Dist. moyenne itin. décrits = 7.21 Km
Dist. moyenne itin. simulés = 7.06 Km
DE VOYAGEURS(X10)
0.00
20.00
40.00
60.00
80.00
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 +
KM

- Par contre, si la fonction d'impédance ne considère pas une pénalité p_j , la qualité de la simulation diminue sensiblement. Les coefficients r^2 tombent, pour les variables "achalandage" et "volume au lien de charge maximale", jusqu'à 0.76 et 0.78 respectivement (tableau 5.5). D'un autre côté la figure 5.3 montre l'effet sur la charge de la ligne 2 du métro d'une mauvaise calibration. Le profil "itinéraires simulés TP1-4" correspondant à la simulation avec la quatrième fonction d'impédance (THVS = $\sum_{j=1}^{q} (i_j/2)$) surestime la demande, tout au long de la ligne, atteignant une surestimation maximale (10% environ) au point de charge maximale de la ligne.

5.2.2 Comportement de différents groupes d'usagers face au choix d'itinéraires

L'analyse de comparaison de type 1 que nous venons de présenter nous a permis d'entreprendre une étude dont l'objectif est de définir des variables qui puissent expliquer les différences de comportement entre les usagers du transport en commun. La variable dépendante "comportement d'un usager" a été associée au type de déplacement de cet usager. Ce type étant défini, d'une façon arbitraire, par la relation de comparaison entre l'itinéraire décrit et ses cinq itinéraires simulés. Après une analyse de l'information disponible, nous avons retenu les quatre types suivants:

- Déplacement type A: les cinq itinéraires simulés sont différents de l'itinéraire décrit.

- Déplacement type B: les itinéraires simulés 3 et/ou 4 sont différents de l'itinéraire décrit.
- Déplacement type C: aucun itinéraire simulé n'est différent de l'itinéraire décrit.
- Déplacement type D: tous les cas qui restent.

Le tableau 5.6 présente une classification des déplacements analysés par type.

Tableau 5.6 Classification des déplacements par type

Type de déplacement	Nombre	Pourcentage (%)
A	2870	16.46
B	1817	10.42
C	11705	67.13
D	1044	5.99
TOTAL	17436	100.00

L'aspect le plus remarquable de ces résultats est le très haut pourcentage (84%) de déplacements qui restent invariables lors des cinq simulations effectuées. En ce qui concerne les déplacements toujours différents, nous avons vu qu'une partie importante de ceux-ci (environ 40%) étaient dus aux problèmes d'accès, d'autres (qui n'ont pas été quantifiés) étaient dus aux problèmes de codification et de validation et un maximum de 10 à 12% pourraient être dus aux problèmes

de perception des temps des alternatives disponibles.

Entre les variables explicatives des comportements des voyageurs nous avons sélectionné des variables concernant les voyageurs (sexe, âge) et des variables concernant les caractéristiques de leurs déplacements (but du déplacement, nombre de lignes empruntées dans l'itinéraire décrit et mode de transport en commun utilisé). Les valeurs prises par ces variables peuvent être:

SEXE (hommes, femmes)
AGE (-18 ans, entre 18 et 65 ans, + 65 ans)
BUT (travail, étude, autres)
NSECT (1,2...6)
MODE (métro, autobus, métro-autobus).

Etant donné le type des variables utilisées nous avons mesuré la corrélation entre les variables indépendantes et la dépendante au moyen des coefficients de contingence. Ces coefficients sont présentés au tableau 5.7.

Même si au niveau de confiance de 95% l'hypothèse d'indépendance de chacune des variables explicatives et les comportements des usagers (type de déplacement) doit être rejetée, les coefficients de contingence obtenus indiquent que:

- La dépendance entre le sexe des voyageurs, l'âge des voyageurs et le but des déplacements avec le type de déplacement est extrêmement faible.

Tableau 5.7 Coefficients de contingence entre le "type de déplacement" et certaines variables indépendantes

Variable indépendante	Coefficient de contingence
SEXE	0.015
ÂGE	0.067
BUT	0.055
NSECT	0.475
MODE	0.265

- Le type de déplacement (et conséquemment le comportement des voyageurs) dépend assez fortement de la complexité (nombre de sections empruntées) de l'itinéraire décrit. Cette dépendance est illustrée (pour la deuxième comparaison de type 1) dans la figure 5.5.

- Le type de déplacement dépend aussi du mode de transport en commun utilisé. Il faut souligner que cette dépendance est due au fait que les variables NSECT et MODE sont elles-mêmes dépendantes. En effet, le mode métro est utilisé dans des déplacements d'une ou de deux sections de ligne, tandis que les modes métro-autobus et autobus sont utilisés dans les déplacements de 1 à 6 sections de ligne.

Finalement, il faut dire que les données disponibles n'ont pas permis de grouper les usagers en regard de leurs caractéristiques économiques (revenu par exemple),celles qui, a priori, pourraient

expliquer des différences de comportement entre les usagers du transport en commun. Visant cet aapect, nous avons testé aussi la variable "district d'origine du voyageur". Pour ce faire, nous avons divisé la région d'étude en 11 grands districts. Le coefficient de contingence obtenu est assez faible (0.157). Cependant, 1'homogénité des caractéristiques des usagers de chaque district étant très discutable nous avons préféré ne pas tirer de conclusion.

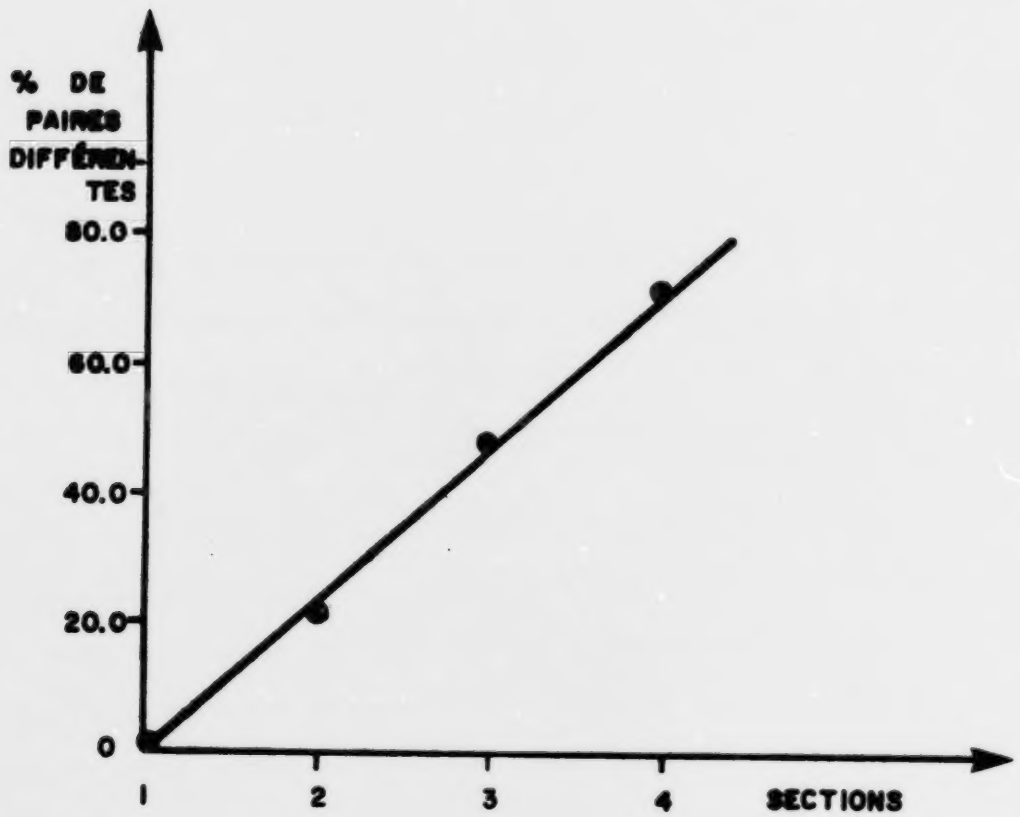


Figure 5.5 Variation du pourcentage de paires différentes avec le nombre de sections de ligne de l'itinéraire décrit.

5.3 Analyse de comparaison de type 2

Un des modules d'accès du modèle TRANSCOM, et peut-être celui qu'on peut présumer être le plus facile à utiliser lors de simulations d'études à long terme, consiste à transformer la matrice origine-destination entre zones en une matrice origine-destination entre noeuds du réseau (voir Chriqui, 1974). Ces noeuds, pour simplifier, sont choisis les plus proches des centroïdes des zones d'origine et de destination. A priori, et sans besoin d'analyses empiriques, cette manière d'aborder le problème de l'accès semble très peu satisfaisante. En effet elle suppose qu'un usager, connaissant sa zone de destination, choisit les noeuds d'entrée et de sortie du réseau d'une façon "aveugle", c'est-à-dire, comme si le temps total de voyage entre les noeuds choisis était inconnu. Une hypothèse implicite de cette modélisation de l'accès est que, en se déplaçant d'une zone d'origine à une zone de destination, l'usager cherche à minimiser le temps (ou la distance) de marche (ou d'accès). Les résultats que nous présentons par la suite confirment la faiblesse de cette hypothèse.

Le tableau 5.8 résume les résultats de la comparaison désagrégée d'itinéraires décrits et simulés de type 2. Le nombre d'itinéraires décrits non reproduits est de 73.35%. Les indicateurs globaux (voir tableau 5.9) indiquent une forte surestimation du nombre de sections empruntées par déplacement due à une surutilisation importante (41%) des lignes de surface. Ce phénomène se produit parce qu'un choix incorrect des noeuds extrémités d'un déplacement se traduit souvent, soit par

l'emprunt d'une ligne additionnelle avant de reprendre l'itinéraire correct, soit par l'emprunt d'un itinéraire complètement différent et plus long (la longueur moyenne d'un itinéraire décrit est de 7.21 km et d'un itinéraire simulé de 7.47 km).

Un des aspects les plus négatifs d'une simulation de type 2 est la mauvaise reproduction des variables aussi importantes que l'achalandage des lignes et que le nombre de passagers transportés aux liens de charge maximale. Il faut remarquer cependant, que malgré des résultats en général déficients, la simulation des flots sur le métro demeure raisonnable (voir le tableau 5.10 et les figures 5.6 et 5.7). Même si sur les lignes à fort achalandage, se produit une compensation des erreurs ("itinéraires incorrects passant par le bon endroit"), ceci n'explique pas tout. Vu que le métro est la colonne vertébrale du système de transport collectif à Montréal, un mauvais accès produit normalement des changements dans la partie "surface" des déplacements décrits qui l'utilisent. Cependant, dans une proportion assez élevée (de l'ordre de 75%) la partie métro reste presque invariable. Des variations concernant la façon d'arriver au métro (en autobus ou à pied) ainsi que le choix des stations d'entrée ou de sortie peuvent se présenter.

5.4 Analyse de comparaison de type 3

5.4.1 Détermination des noeuds et des temps d'accès

Comme on l'a déjà souligné, dans ce cas, les itinéraires simu-

Tableau 5.8 Résultats de la comparaison (type 2) entre itinéraires décrits et simulés

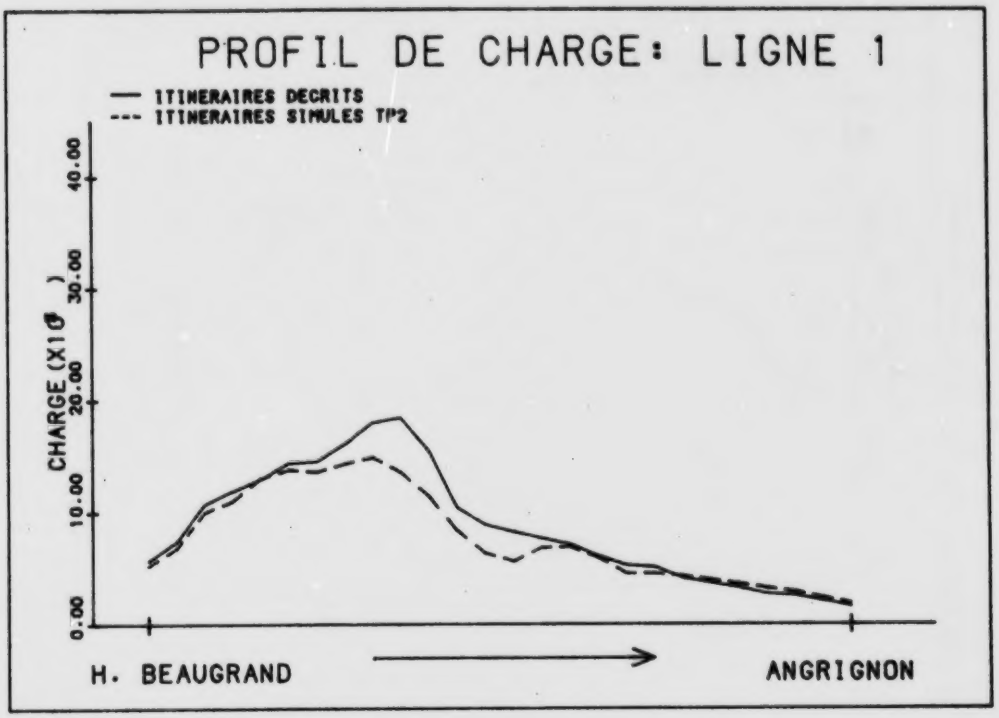
Temps hors véhicule (Réseau)	# et % ITEG	# et % ITCO	# et % ITDI	$\bar{X}(\lvert TDS-TDD \rvert)$ (min)	S(TDS-TDD) (min)	$r^2(TDS,TDD)$	$\bar{X}(\lvert THVS-THVD \rvert)$	S(THVS-THVD)	$r^2(THVS,THVD)$
$\sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$	4230 (24.29)	411 (2.36)	12 774 (73.35)	7.7	10.0	0.6724	5.9	7.7	0.2916

Tableau 5.9 Indicateurs globaux obtenus du chargement sur les réseaux des itinéraires décrits et simulés (type 2) (itinéraires décrits = indice 100)

Itinéraires chargés	Sections/Déplac.	Passagers métro	Sections métro	Correspondances métro-métro	Sections autobus
Décrits	1.917 (100)	160 857 (100)	211 402 (100)	50 545 (100)	419 013 (100)
Simulés $(THVS=\sum_{j=1}^{q} (i_j+5))$	2.370 (124)	155 990 (97)	187 957 (89)	31 967 (63)	590 460 (141)

Tableau 5.10 Statistiques de comparaison d'itinéraires décrits et simulés de type 2 (niveau d'agrégation moyen)

Variables (ou paires de variables)	Comparaison de type 2 (THVS = $\sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$)		
	$\bar{X}$	S	r^2
(ACHDI2/ACHDE) * 100	-153.68	853.82	-
(CMXDI2/CMXDE) * 100	-101.75	822.52	-
(ENDIF2/ENTDE) * 100	1.28	53.90	-
(SODIF2/SORDE) * 100	-0.97	42.42	-
(ACHDE,ACHSTP2)	-	-	0.6601
(CMXDE,CMXSTP2)	-	-	0.5598
(ENTDE,ENTSTP2)	-	-	0.9651
(SORDE,SORSTP2)	-	-	0.9060



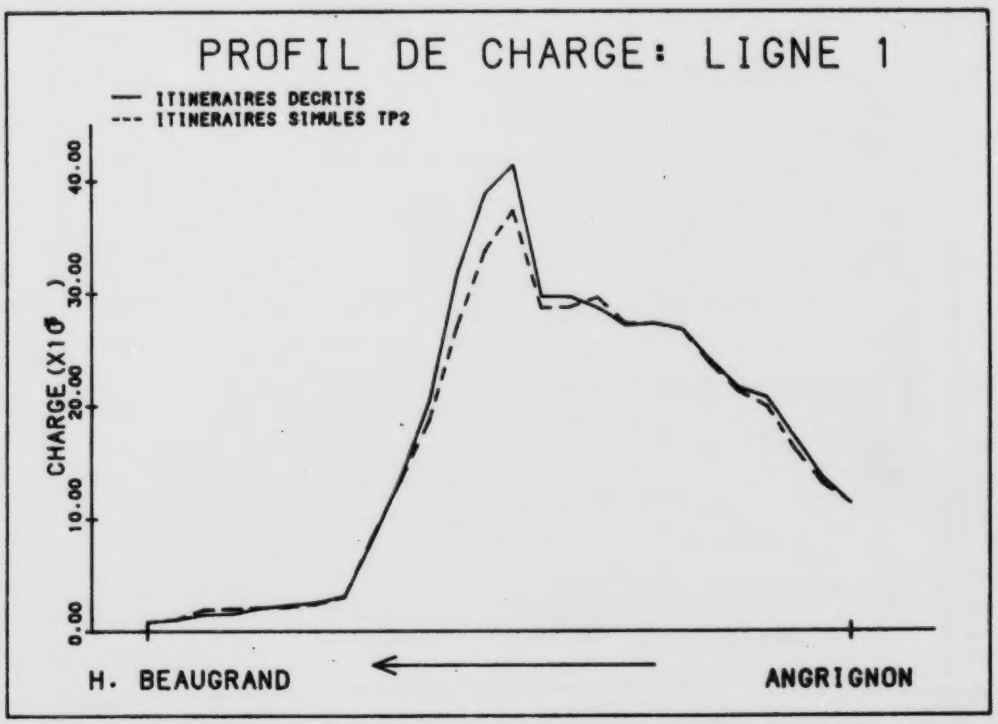
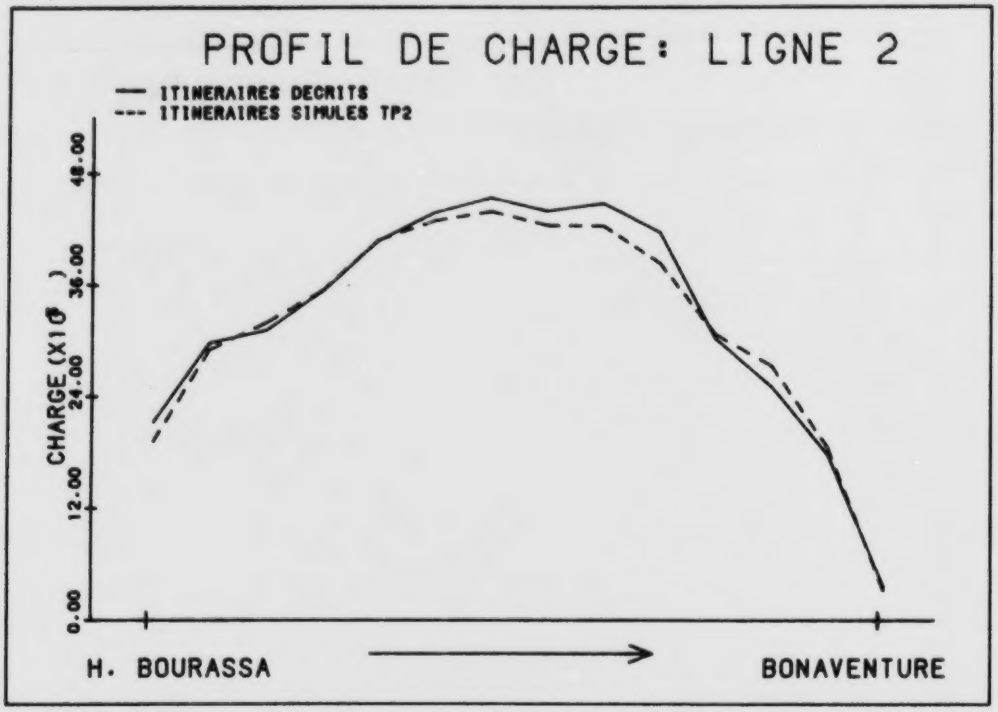


Figure 5.6 Profils de charge: ligne 1 du métro (comparaison de type 2)



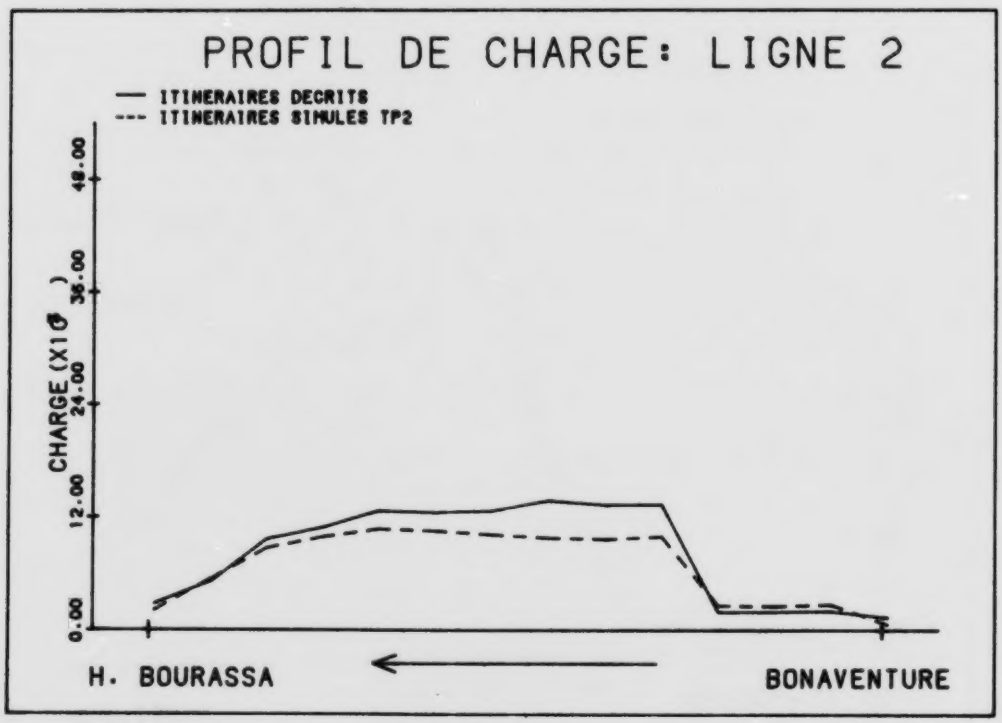
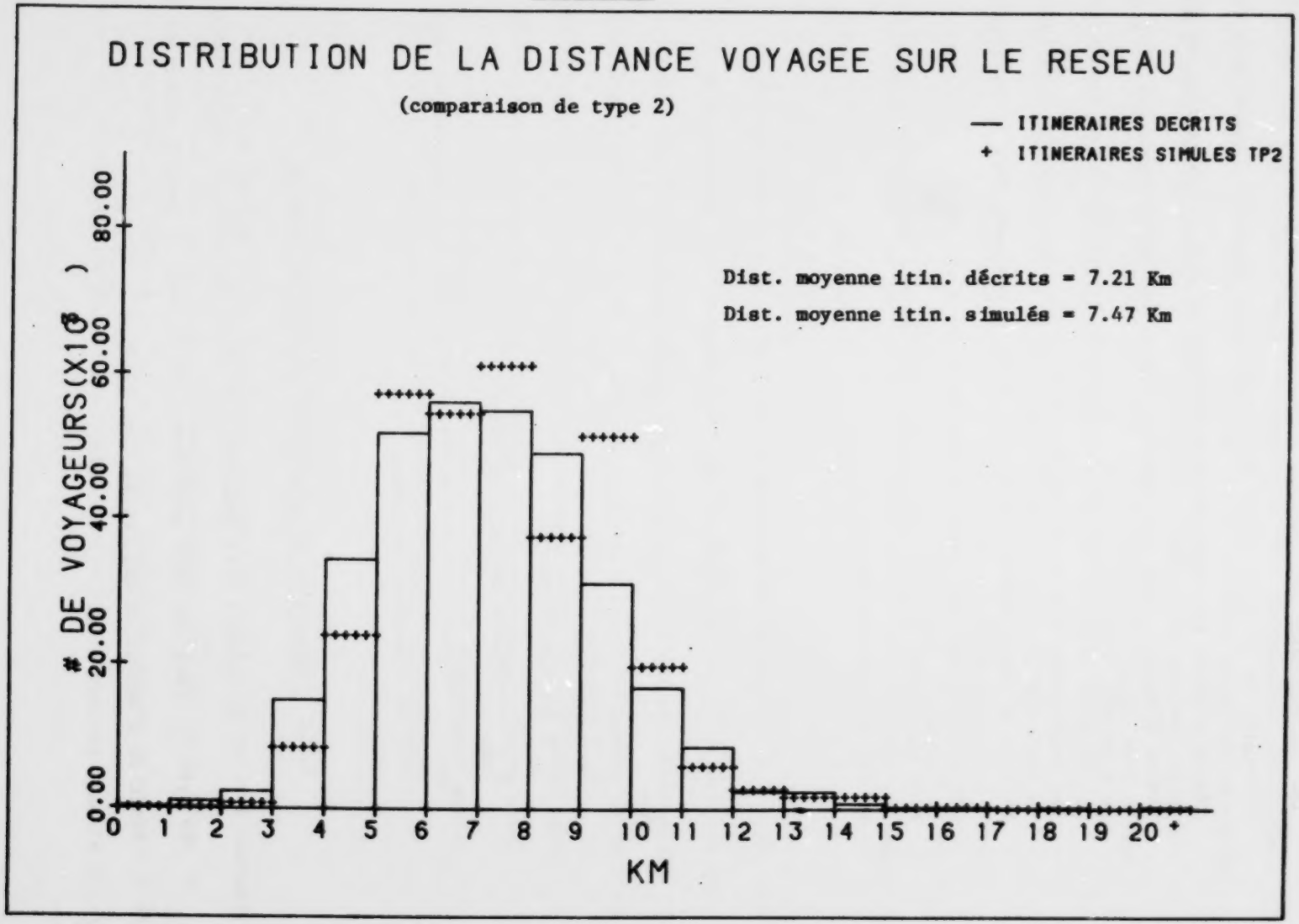


Figure 5.7 Profils de charge: ligne 2 du métro (comparaison de type 2)

Figure 5.8


DISTRIBUTION DE LA DISTANCE VOYAGEE SUR LE RESEAU
(comparaison de type 2)
ITINERAIRES DECRITS
ITINERAIRES SIMULES TP2
Dist. moyenne itin. décrits = 7.21 Km
Dist. moyenne itin. simulés = 7.47 Km
DE VOYAGEURS(X10)
0.00
20.00
40.00
60.00
80.00
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 +
KM

lés correspondent aux chemins d'impédance minimale entre les centroïdes d'origine et de destination des itinéraires décrits. Chaque zone de la région d'étude est associée à un minimum de deux et un maximum de quatre noeuds d'accès. Dans une première étape, les deux noeuds les plus proches du centroïde sont sélectionnés. Ensuite, si par un de ces noeuds (ou les deux) passe une seule ligne (ℓ) dans un seul sens (aller ou retour) un autre noeud d'accès (ou deux autres) est défini (le plus proche du centroïde par lequel passe la ligne ℓ en sens inverse). Une fois les noeuds d'accès déterminés, les temps d'accès (t_a) sont calculés selon l'expression suivante:

$$t_a = \begin{cases} d_a/V_m & \text{si } d_a \leq D_{max} \\ D_{max}/V_m + (d_a - D_{max})/V_{TC} & \text{si } d_a > D_{max} \end{cases} \qquad (5.1)$$

où:

d_a = distance d'accès

V_m = vitesse de marche

D_{max} = distance maximale de marche

V_{TC} = vitesse fictive d'accès, équivalente à la vitesse moyenne du transport en commun.

5.4.2 Comparaison d'itinéraires décrits et simulés

Le tableau 5.11 présente les résultats des six comparaisons de type 3. Dans les cinq premières simulations, la partie réseau de la fonction d'impédance est restée fixe ($THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$). Le facteur de

pondération du temps d'accès (paramètre a_5 de l'expression 4.6) varie entre 0.0 et 2.5. Dans les cinq cas, le pourcentage de psires différentes se situe entre 60% et 63% approximativement. La sixième comparaison, comme on l'avait fait dans les comparaisons de type 1, sert à montrer l'effet d'une mauvaise calibration de la fonction d'impédance. Dans ce cas, nous avons pris le meilleur paramètre a_5 (1.0) et considéré une fonction d'impédance (sur le réseau) sans pénalité associée à l'emprunt d'une ligne (THVS = $\sum_{j=1}^{q} (i_j/2)$). La proportion de paires différentes pour cette simulation est de l'ordre de 15% plus élevée que pour la meilleure des comparaisons précédentes.

En général, les résultats présentés aux tableaux 5.11 à 5.13, comme dans le cas de la comparaison de type 2, montrent une détérioration considérable par rapport aux comparaisons de type 1, ce qui est dû complètement aux problèmes d'accès et d'agrégation spatiale. Evidemment, on doit admettre que la façon de déterminer les temps d'accès lors de notre expérience est assez arbitraire. Cependant il faut accepter qu'elle n'est ni plus ni moins arbitraire que les autres méthodes normalement utilisées (détermination des distances moyennes d'accès, par exemple).

5.5 Synthèse des résultats et conclusion

Les tableaux 5.14 à 5.16 et les figures 5.9 à 5.12 mettent ensemble les résultats des meilleures simulations obtenues lors des trois types de comparaisons réalisées. Les faits que nous soulignons par la suite sont à la base des hypothèses du modèle d'affectation que nous proposons dans ce tra-

Tableau 5.11 Résultats des comparaisons (type 3) entre itinéraires décrits et simulés

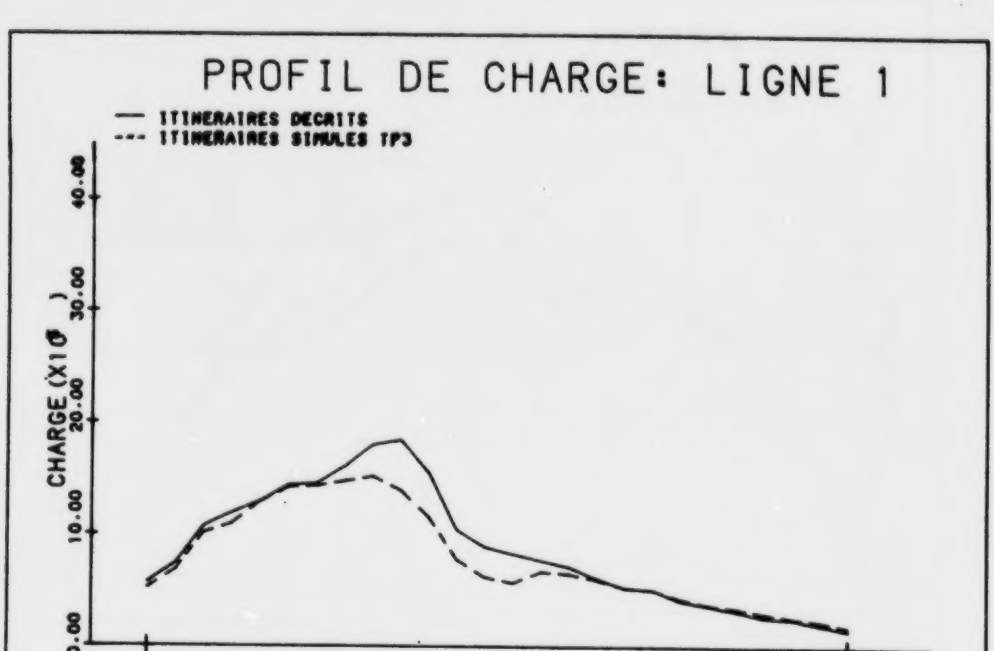
Caractéristiques des fonctions d'impédance	# et % ITEG	# et % ITCO	# et % ITDI	$\bar{X}(\lvert TDS-TDD \rvert)$ (min)	S(TDS-TDD) (min)	r^2(TDS,TDD)	$\bar{X}(\lvert THVS-THVD \rvert)$ (min)	S(THVS-THVD)	r^2(THVS-THVD)
$THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j+5)$ $a_5 = 0.0$	5793 (33.68)	734 (4.27)	10673 (62.05)	5.5	8.9	0.7396	3.7	6.3	0.4096
$THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j+5)$ $a_5 = 1.0$	6091 (35.31)	743 (4.31)	10414 (60.38)	5.3	8.9	0.7396	3.7	6.1	0.4096
$THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j+5)$ $a_5 = 1.5$	5892 (34.16)	717 (4.16)	10639 (61.68)	5.4	9.0	0.7396	3.8	6.3	0.3969
$THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j+5)$ $a_5 = 2.0$	5746 (33.31)	680 (3.94)	10822 (62.74)	5.5	9.1	0.7396	4.0	6.4	0.3969
$THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j+5)$ $a_5 = 2.5$	5600 (32.47)	669 (3.88)	10979 (63.65)	5.7	9.2	0.3796	4.1	6.5	0.3844
$THVS=\sum_{j=1}^{q}(i_j/2)$ $a_5 = 1.0$	4624 (26.89)	687 (4.00)	11883 (69.11)	3.2	5.7	0.8100	1.2	2.1	0.2601

Tableau 5.12 Indicateurs globaux obtenus du chargement sur le réseau des itinéraires décrits et simulés (type 3). (Itinéraires décrits = indice 100)

Itinéraires chargés	Sections/déplac.	Passagers métro	Sections métro	Correspondances métro-métro	Sections autobus
Itinéraires décrits	1.917 (100)	160 857 (100)	211 402 (100)	50 545 (100)	419 013 (100)
Itinéraires simulés type 3	2.060	160 875	200 763	39 888	467 484
(THVS= $\sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$)	(107)	(100)	(95)	(79)	(112)
Itinéraires simulés type 3	2.460	184 318	242 237	57 919	555 486
(THVS= $\sum_{j=1}^{q} (i_j/2)$)	(128)	(115)	(115)	(115)	(133)

Tableau 5.13 Statistiques de comparaison d'itinéraires décrits et simulés de type 3 (niveau d'agrégation moyen)

Variables (ou paires de variables)	Comparaison de type 3 ($THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$)			Comparaison de type 3 ($THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j/2)$)		
	$\bar{X}$	S	r^2	$\bar{X}$	S	r^2
(ACHDI3/ACHDE) * 100	-8.80	80.09	-	-43.67	128.67	-
(CMXDI3/CMXDE) * 100	6.15	64.18	-	-6.53	130,71	-
(ENDIF3/ENTDE) * 100	-11.32	60.50	-	-22,71	71.47	-
(SODIF3/SORDE) * 100	-2.63	36.02	-	-28.99	63.13	-
(ACHDE,ACHSTP3)	-	-	0.8075	-	-	0.7247
(CMXDE,CMXSTP3)	-	-	0.8042	-	-	0.7223
(ENTDE,ENTSTP3)	-	-	0.9747	-	-	0.9207
(SORDE,SORSTP3)	-	-	0.8636	-	-	0.9090



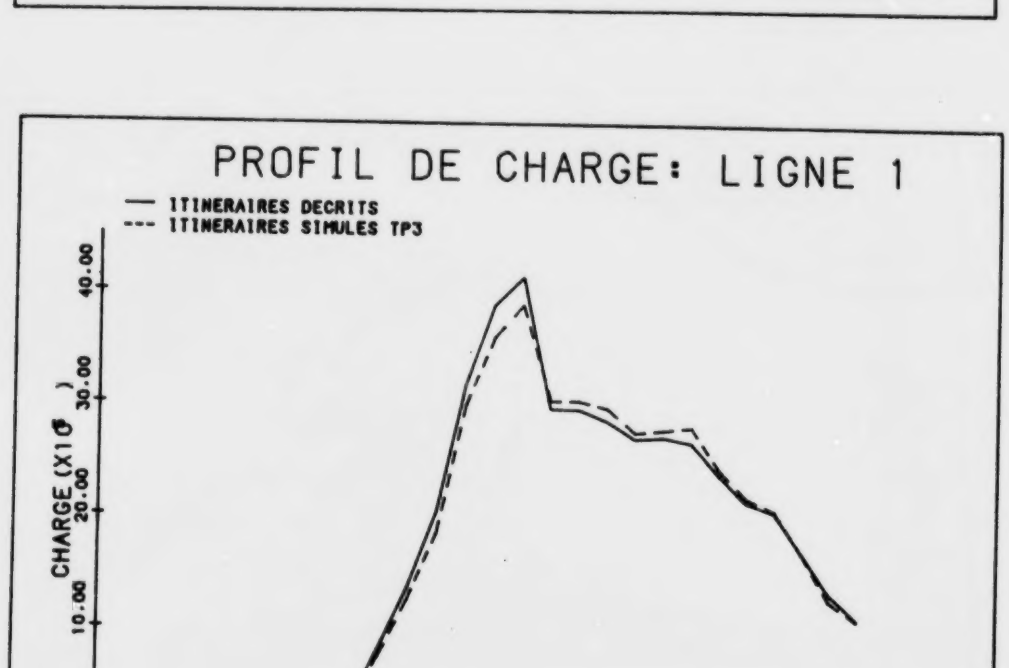
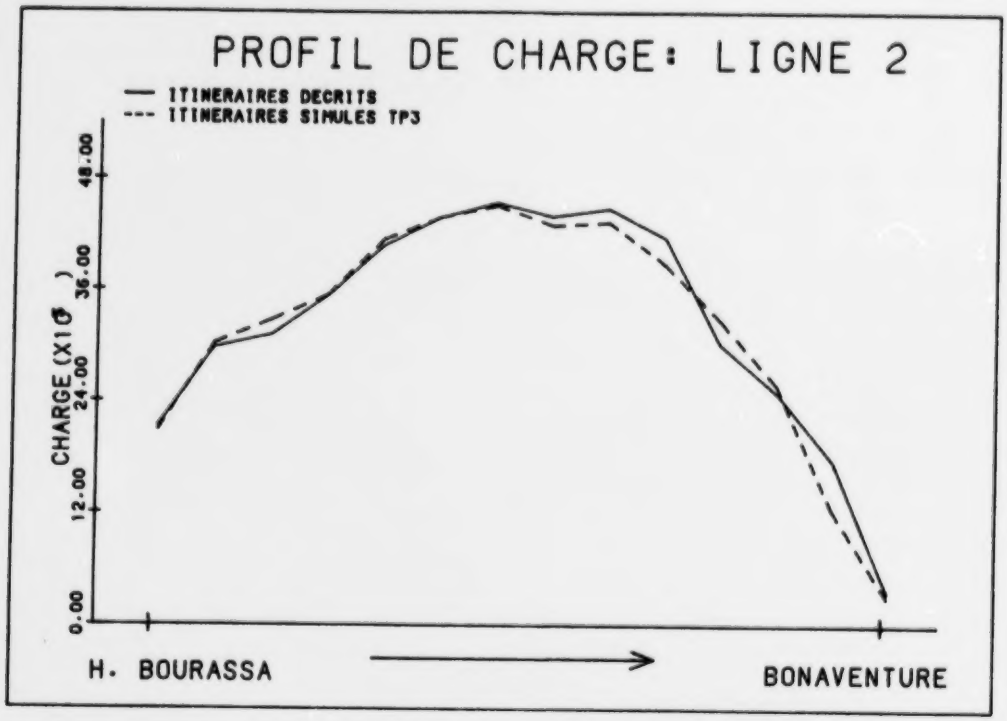


Figure 5.9 Profils de charge: ligne 1 du métro
(comparaison de type 3)



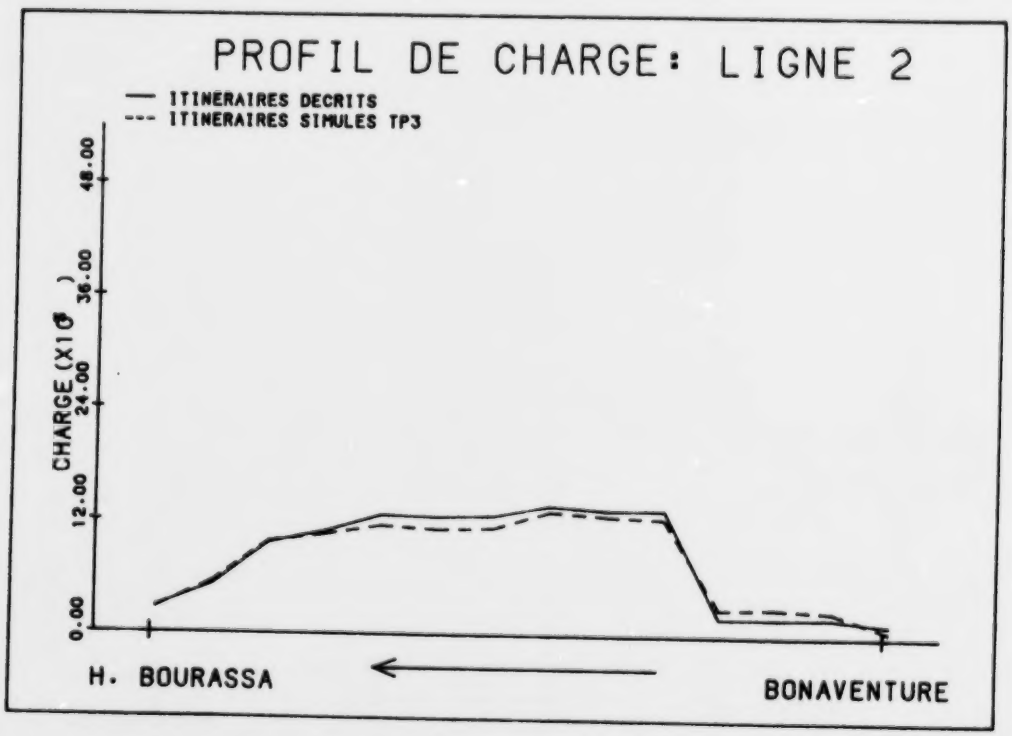
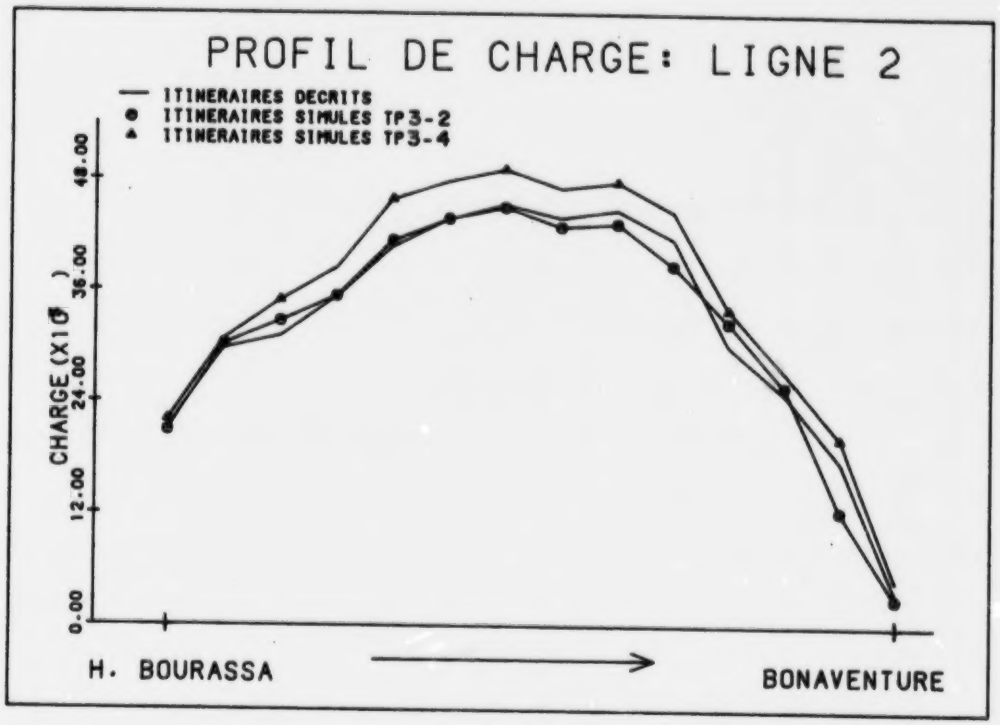


Figure 5.10 Profils de charge: ligne 2 du métro (comparaison de type 3)



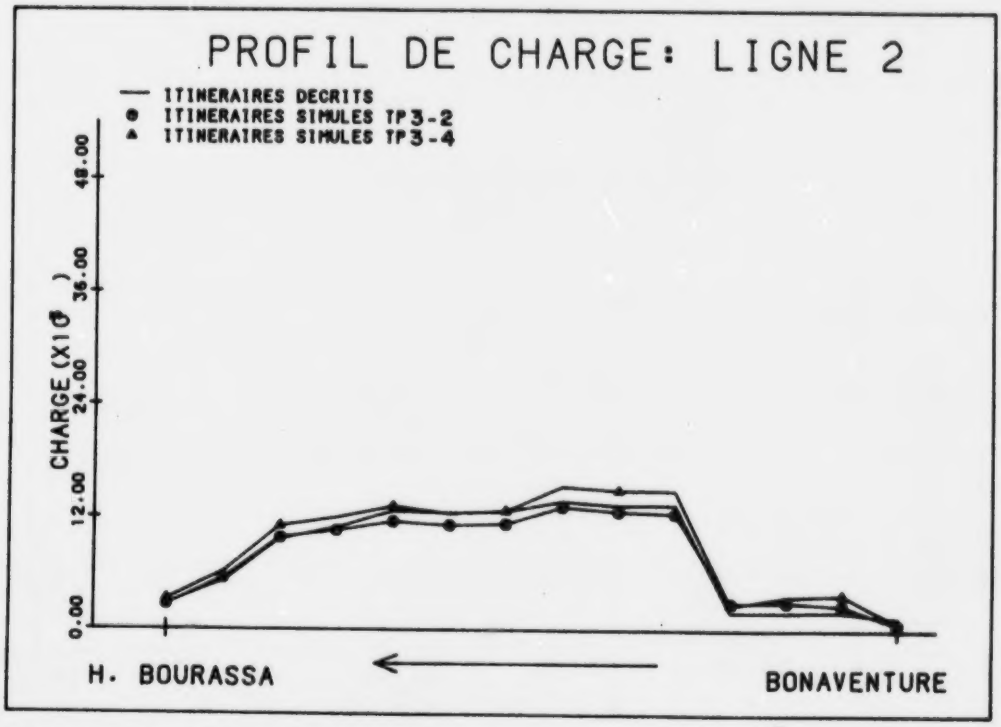
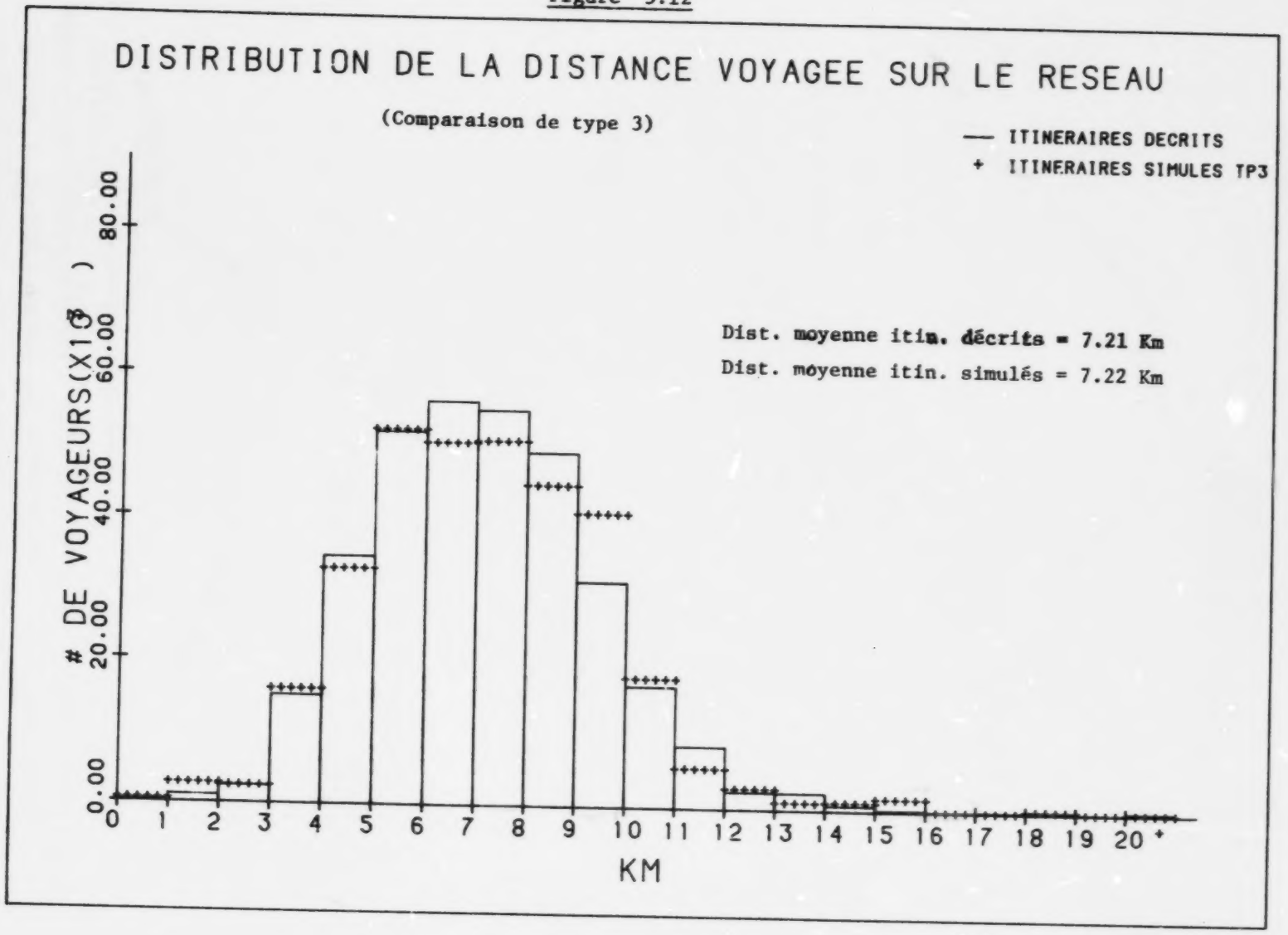


Figure 5.11 Effet d'une mauvaise calibration (THVS= $\sum_{j=1}^{q} i_j/2$) sur les profils de charge de la ligne 2 du métro (comparaison de type 3)

Figure 5.12


DISTRIBUTION DE LA DISTANCE VOYAGEE SUR LE RESEAU
(Comparaison de type 3)
ITINERAIRES DECRITS
ITINERAIRES SIMULES TP3
Dist. moyenne itin. décrits = 7.21 Km
Dist. moyenne itin. simulés = 7.22 Km
DE VOYAGEURS(X10)
0.00
20.00
40.00
60.00
80.00
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 +
KM

vail (1):

- Un algorithme simple de calcul de chemin d'impédance minimale permet de reproduire environ 80% des itinéraires décrits sur le réseau (paires égales et communes), et une analyse des paires différentes indique que 39% d'entre-elles sont dues au problème d'accès. En conséquence, environ 12% des quelques 17.400 itinéraires analysés ne sont pas reproduits, soit à cause d'un comportement des usagers différent de celui supposé par le modèle, soit à cause d'erreurs de codification du réseau.

- Lorsque le choix des noeuds d'accès intervient (comparaisons de type 2 et 3) le taux de reproduction des itinéraires décrits décroît considérablement. En effet, les pourcentages des paires différentes pour les compraisons de type 2 et 3 sont d'environ 73% et 60% respectivement.

Ces deux remarques nous amènent à conclure que:

- Les usagers de transport en commun à Montréal (pendant la période de pointe du matin) utilisent, en général, le chemin d'impédance minimale sur le réseau.

- Le même comportement devrait être attendu pour le déplacement complet. Alors, la mauvaise performance de l'algorithme d'affectation utilisé dans notre expérience lors des comparaisons de type 2 et 3 (voir tableaux 5.15 et 5.16) est due principalement aux problèmes d'accès et d'agrégation spatiale.

---

(1) D'autres conclusions de l'analyse expérimentale seront présentées au chapitre VIII.

Tableau 5.14 Résultats des comparaisons entre itinéraires décrits et simulés

Type de comparaison	% ITEG	% ITCO	% ITDI	$\bar{X}(\lvert TDS-TDD \rvert)$ (min)	S(TDS-TDD) (min)	r^2(TDS,TDD)	$\bar{X}(\lvert THVS-THVD \rvert)$ (min)	S(THVS-THVD) (min)	r^2(THVS,THVD)
Comparaison type 1	72.37 (79.52)(1)	7.63 (8.28)(1)	20.00 (12.20)(1)	1.70	4.70	0.9216	1.10	3.10	0.8281
Comparaison type 2	24.29	2.36	73.35	7.7	10.00	0.6724	5.90	7.70	0.2916
Comparaison type 3	35.31	4.31	60.38	5.3	8.90	0.7396	3.70	6.10	0.4096

(1) Résultats après l'analyse détaillée de paires différentes (accès au lien).

Tableau 5.15 Indicateurs globaux obtenus au chargement sur le réseau des itinéraires décrits et simulés. (Itinéraires décrits: indice 100).

	Sections/déplac.	Passagers métro	Sections métro	Correspondances métro-autobus	Sections autobus
Itinéraires décrits	1.917 (100)	160 857 (100)	211 402 (100)	50 545 (100)	419 013 (100)
Itinéraires simulés type 1 ($THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$)	1.888 (98)	163 596 (102)	206 687 (98)	43 171 (85)	414 166 (99)
Itinéraires simulés type 2 ($THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$)	2.370 (124)	155 990 (97)	187 957 (89)	31 967 (63)	590 460 (141)
Itinéraires simulés type 3 ($THVS = \sum_{j=1}^{q} (i_j+5)$, $a_5 = 1.0$)	2.060 (107)	160 875 (100)	200 763 (95)	39 888 (79)	467 484 (112)

Tableau 5.16 Coefficients r^2 entre certaines paires de variables (décrites-simulées) pour les trois types de comparaisons.

Paires de variables	Comparaison type 1	Comparaison type 2	Comparaison type 3
ACHDE,ACHSI	0.9004	0.6601	0.8075
CMXDE,CMXSI	0.9088	0.5598	0.8042
ENTDE,ENTSI	0.9893	0.9651	0.9747
SORDE,SORSI	0.9939	0,9060	0.8636

CHAPITRE VI

DESCRIPTION DES MODÈLES PROPOSES

6.1 Introduction

La discussion des modèles opérationnels d'affectation en transport en commun présentée au chapitre III et les résultats de l'analyse expérimentale que nous venons de voir au chapitre V, constituent les sources des hypothèses de base du modèle d'affectation que nous proposons dans ce travail. Tout d'abord, il faut dire que ces hypothèses ne sont pas nouvelles. D'autres modèles (notamment TRANSCOM et TRANSEPT) se basent plus ou moins sur les mêmes principes que le nôtre. Les différences, comme on le verra aux sections qui suivent, se produisent tant au niveau de la conception globale et de la structure informatique du modèle qu'au niveau de certains modules spécifiques (accès, cheminement et diversion) où nous proposons des sous-modèles alternatifs.

Les hypothèses de base de ce modèle, auxquelles nous ajouterons ensuite des hypothèses propres à chaque module, sont les suivantes:

a) Pour se déplacer entre deux points quelconques d'une région desservie par un réseau de transport en commun, les voyageurs choisissent toujours le chemin qui minimise une certaine fonction d'impédance ou coût généralisé de voyage.

b) Tous les voyageurs ont la même perception des différentes composantes de la fonction d'impédance.

c) Entre deux zones de la région desservie par le réseau de transport en commun il peut arriver cependant que plus d'un chemin soit utilisé. Cela ne constitue pas une contradiction à la première hypothèse, mais une reconnaissance du fait que la population et l'activité d'une zone se trouvent distribuées en son intérieur et non pas concentrées en un seul point (centroïde).

Ainsi, le modèle d'affectation que nous proposons, produit la diversion du flot entre deux zones sur des chemins différents mais, entre deux noeuds du réseau de transport en commun, seulement les chemins d'impédance minimale sont chargés. Une exception se produit quand il existe des lignes communes, où, si l'utilisateur le désire, la charge peut être répartie entre les lignes communes proportionnellement à leurs fréquences. La diversion est le résultat d'une politique d'accès multiple au réseau; chaque alternative (chemins d'impédance minimale entre noeuds d'accès à l'origine et à la destination) étant associée à une probabilité d'être empruntée. Nous appelons ce type de modèle (auquel appartiennent comme on l'a déjà dit les modèles TRANSCOM et TRANSEPT) "ACCES-DIVERSION", pour signifier que l'affectation multichemin entre deux zones se produit au moyen d'un accès multiple au réseau.

6.2 Structure générale du modèle d'affectation

Le modèle que nous proposons est constitué de six modules principaux, indépendants qui agissent dans six étapes successives. Lors des deux premières étapes (STRUCT et ACCES), en partant des données de la codification (noeuds, lignes, zones), sont créées la structure interne du réseau de transport en commun et une liste contenant l'information sur les noeuds d'accès au réseau, pour chaque zone. Les étapes qui suivent, concernent le traitement d'une entrée non nulle de la matrice origine-destination de déplacements entre zones. Le module EXPAN (troisième étape) prend une telle entrée et la convertit en plusieurs déplacements entre la paire O-D correspondante, une entrée pour chaque combinaison possible de noeuds d'accès à l'origine et à la destination. Le module CHEMIN (quatrième étape) se charge d'ajouter aux déplacements O-D réseau provenant de EXPAN l'ensemble de lignes empruntées entre l'origine et la destination, les noeuds de correspondance entre ces lignes (s'il y a lieu) et l'information concernant le temps de déplacement. A la cinquième étape, le module DIVERSION prend tous les déplacements créés par EXPAN (à partir du même déplacement O-D entre zones) ainsi que les probabilités associées à chaque déplacement et il répartit le flot en conséquence. Finalement, le module CHARGE (sixième étape) produit le chargement des déplacements simulés sur le réseau.

Quelques-uns de ces modules ont été empruntés du modèle TRANSCOM ou de son héritier, le modèle MADITUC (1). C'est le cas des

(1) Modèle d'analyse désagrégée d'itinéraires de transport collectif urbain, en développement à l'Ecole Polytechnique de Montréal.

modules STRUCT et CHARGE. Un autre, CHEMIN, est une modification des modules disponibles en TRANSCOM. Trois modules, finalement, ACCES, EXPAN et DIVERSION ont été complètement conçus et développés dans le cadre de cette recherche. Nous présentons par la suite une description sommaire de ces six modules.

a) Le module STRUCT

Les données de base décrivant le réseau de transport en commun à l'étude sont codifiées et puis soumises au module en deux blocs.

- Ensemble de noeuds: les points d'entrée et sortie du réseau et les points de correspondance entre les lignes donnent lieu à un ensemble de noeuds auxquels on associe des coordonnées géographiques prises dans un système d'axes rectangulaires.

- Ensemble de lignes: chaque ligne est caractérisée fondamentalement par sa vitesse commerciale, l'intervalle entre les véhicules pour différentes périodes de la journée, la distance réelle des trajets aller et retour, un mode et la description de son parcours donnée comme une séquence ordonnée des noeuds traversés.

Le module STRUCT vérifie la compatibilité de ces données et produit une représentation interne adaptée aux besoins des modules suivants. Le fichier contenant la représentation informatique du réseau à l'étude sera appelé XRES. La figure 6.1 présente d'une façon schématique ce qu'on vient de décrire.

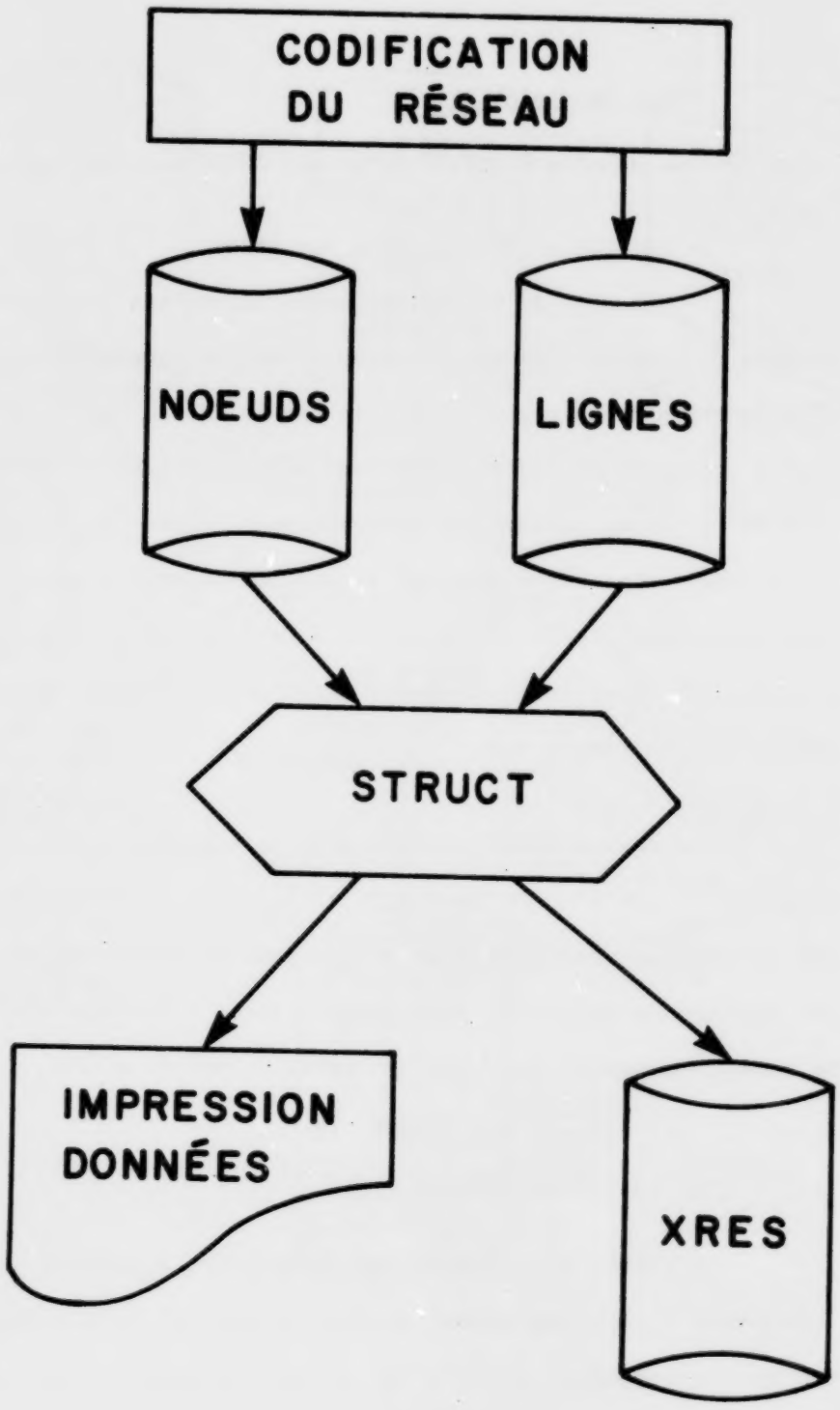


FIG. 6.1 - SCHÉMA DU MODULE STRUCT

b) Le module ACCES

Les données d'entrée du module ACCES sont les suivantes:

- Le fichier XRES produit par STRUCT

- Ensemble de centroïdes et/ou frontières des zones: le modèles d'accès du type discret suppose que la population et l'activité de zones de la région desservie par le réseau de transport en commun sont concentrées en leurs centroïdes. Ces points sont caractérisés par leurs coordonnées géographiques. Comme on le verra, un autre modèle d'accès suppose que la population et l'activité d'une zone sont réparties en son intérieur. Dans ce cas le module ACCES a besoin des frontières des zones, définies par les coordonnées des points qui les constituent.

Le module ACCES (quelque soit la variante choisie) produit la liste "Noeuds d'Accès des Zones" (N.A.Z.) et un vecteur qui pointe sur cette liste, indiquant pour chaque zone l'adresse où commence son information concernant les noeuds d'accès. La figure 6.2 présente schématiquement l'entrée et la sortie du module ACCES.

c) Le module EXPAN

L'entrée de ce module est constituée, d'une part de la liste "les noeuds d'accès des zones" et d'autre part du fichier contenant les entrées correspondant aux itinéraires décrits caractérisés, au minimum, par les informations suivantes: zone origine, zone destination et flot (l'équivalent, en plus désagrégé, des entrées non nulles d'une

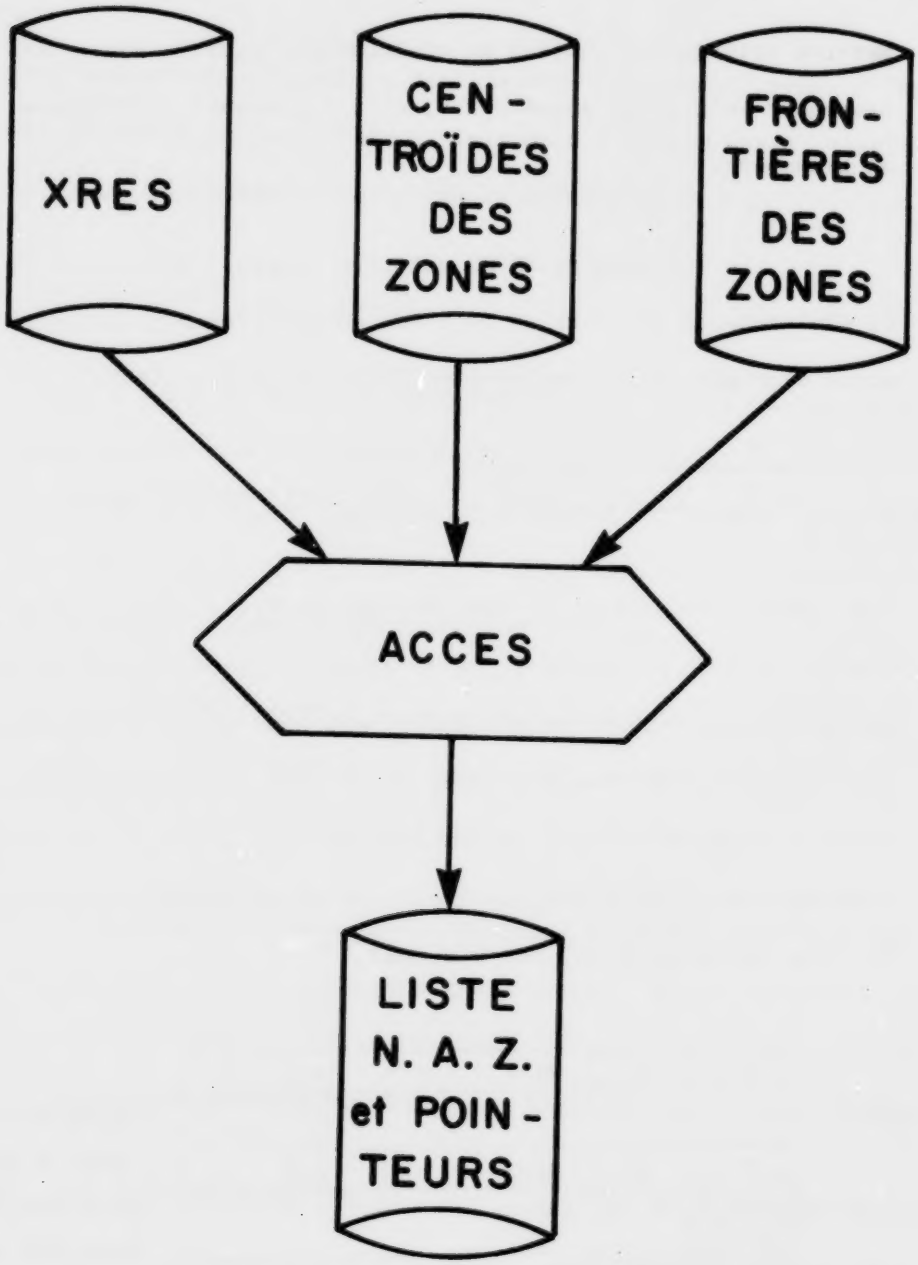


FIG. 6.2 – SCHÉMA DU MODULE ACCES

matrice origine-destination de déplacements entre zones). Ces derniers provenant soit d'une enquête O-D, soit des étapes précédentes du modèle de transport.

La fonction de EXPAN est très simple. Il lit sur le fichier de déplacements entre zones le i-ème enregistrement, indiquant ses zones d'origine et de destination (O,D) et le flot (FLOT):

O	D	FLOT

(Enregistrement d'entrée)

Avec cette information, il cherche dans la liste N.A.Z. les noeuds d'accès de O et D (disons n_1,n_2 et n_3,n_4 respectivement) et crée sur un nouveau fichier un enregistrement pour chaque combinaison possible entre les noeuds d'accès de la zone d'origine et les noeuds d'accès de la zone de destination. Il ajoute à ces enregistrements une variable indiquant que ces déplacements proviennent du i-ème déplacement O-D entre zones:

O	D	FLOT	n_1	n_3	i
O	D	FLOT	n_1	n_4	i
O	D	FLOT	n_2	n_3	i
O	D	FLOT	n_2	n_4	i

(Enregistrements créés à partir du i-ème déplacement O-D entre zones)

Le fichier "expansionné" de déplacements O-D réseau, avant d'être soumis au module suivant (CHEMIN) doit être trié par noeud d'origine. La figure 6.3 présente un schéma du module EXPAN.

d) Le module CHEMIN

La simulation du comportement des usagers du transport en commun est effectuée au moyen du calcul des chemins d'impédance minimale entre les points d'entrée et de sortie du réseau. Le modèle TRANSCOM (voir Chapleau, 1974 et Chriqui, 1974) offre trois algorithmes alternatifs pour le calcul de ces chemins:

. CTM: chemins à temps minimum

. CTPM: chemins à temps perçu minimum

. TRAMIN: chemins à transferts minimum

Dans cette recherche nous avons emprunté et adapté à nos besoins l'algorithme CTM, ce qui suffisait aux objectifs de nos analyses. Evidemment, étant donné la structure modulaire du modèle d'affectation, il n'y aurait pas de problème à adapter les deux autres algorithmes.

L'algorithme CTM modifié permet de déterminer le chemin d'impédance minimale (sans considérer l'existence de lignes communes) entre les points d'entrée et de sortie du réseau. Ces derniers pouvant être des noeuds ou des liens. Il prend comme information d'entrée la liste N.A.Z., le fichier XRES et le fichier de déplacements O-D réseau, trié par noeud (ce qui peut être un lien) d'origine.

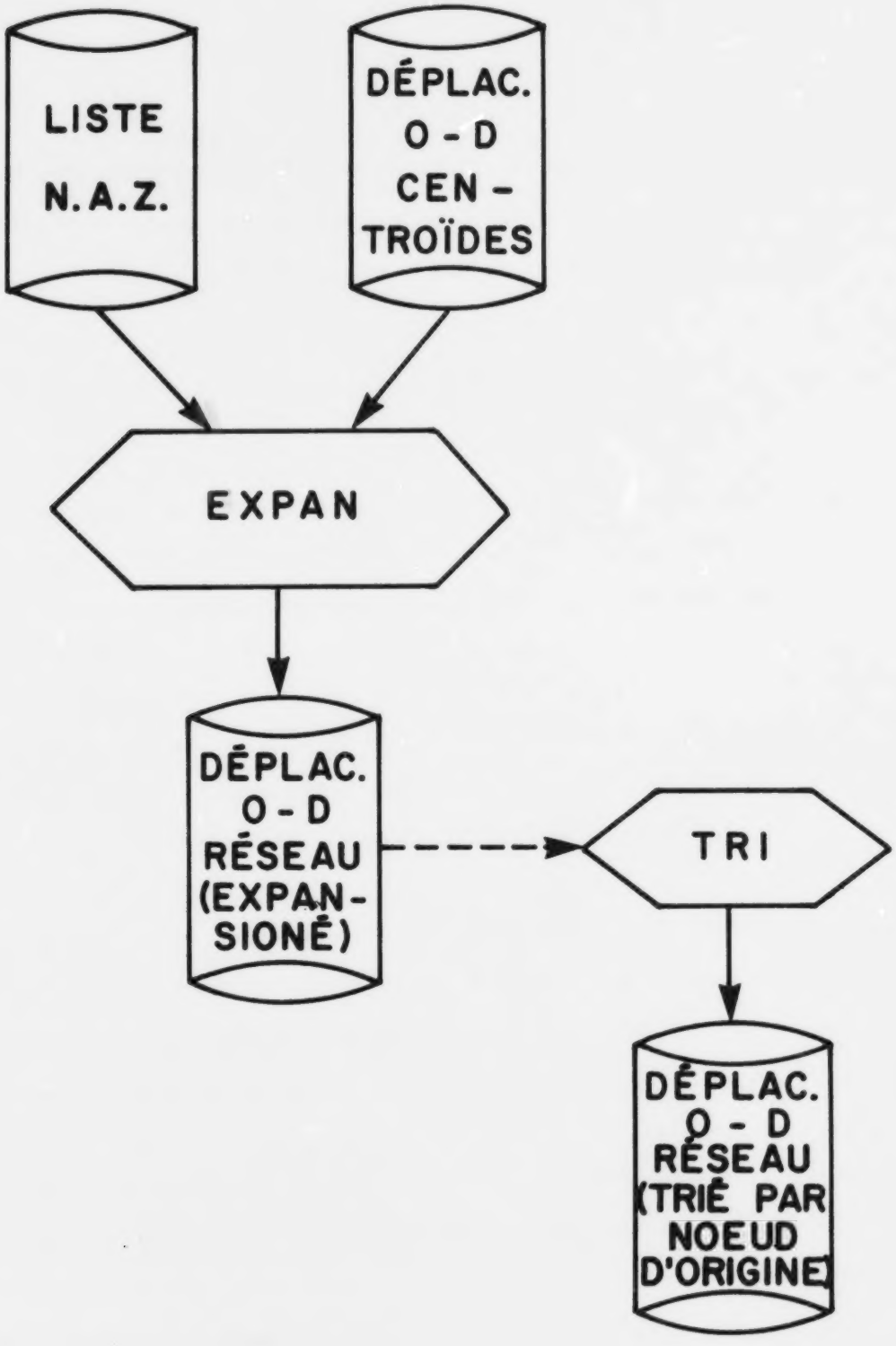


FIG. 6.3 – SCHÉMA DU MODULE EXPAN

Il ajoute à ces déplacements les ensembles des lignes et des noeuds de correspondance de chemins d'impédance minimale ainsi que les temps d'accès (TAC), d'attente (TAT) et de parcours (TP) en véhicule, dans le cas où la population et l'activité des zones sont supposées être concentrées aux centroïdes des zones. Dans le cas contraire, les temps d'accès sont calculés à l'étape de diversion.

Un déplacement O-D réseau, comme celui qui suit,

O	D	FLOT	n_1	n_{k+1}	i

n_1 = noeud initial
n_{k+1} = noeud final
k = nombre de lignes empruntées

devient alors

O	D	FLOT	n_1	n_{k+1}	i	ℓ_1	....	ℓ_k	n_2	....	n_k	TAC	TAT	TP

Le nouveau fichier contenant les itinéraires simulés est trié par la variable i avant d'aller à l'étape 5 (DIVERSION). La figure 6.4 présente un schéma du module chemin.

e) Le module DIVERSION

Ce module calcule, pour chaque chemin alternatif entre une paire donnée de zones, sa probabilité d'être emprunté. Ensuite il répartit le flot en conséquence et produit un fichier d'itinéraires dans le format requis par le module de chargement. Quand la population

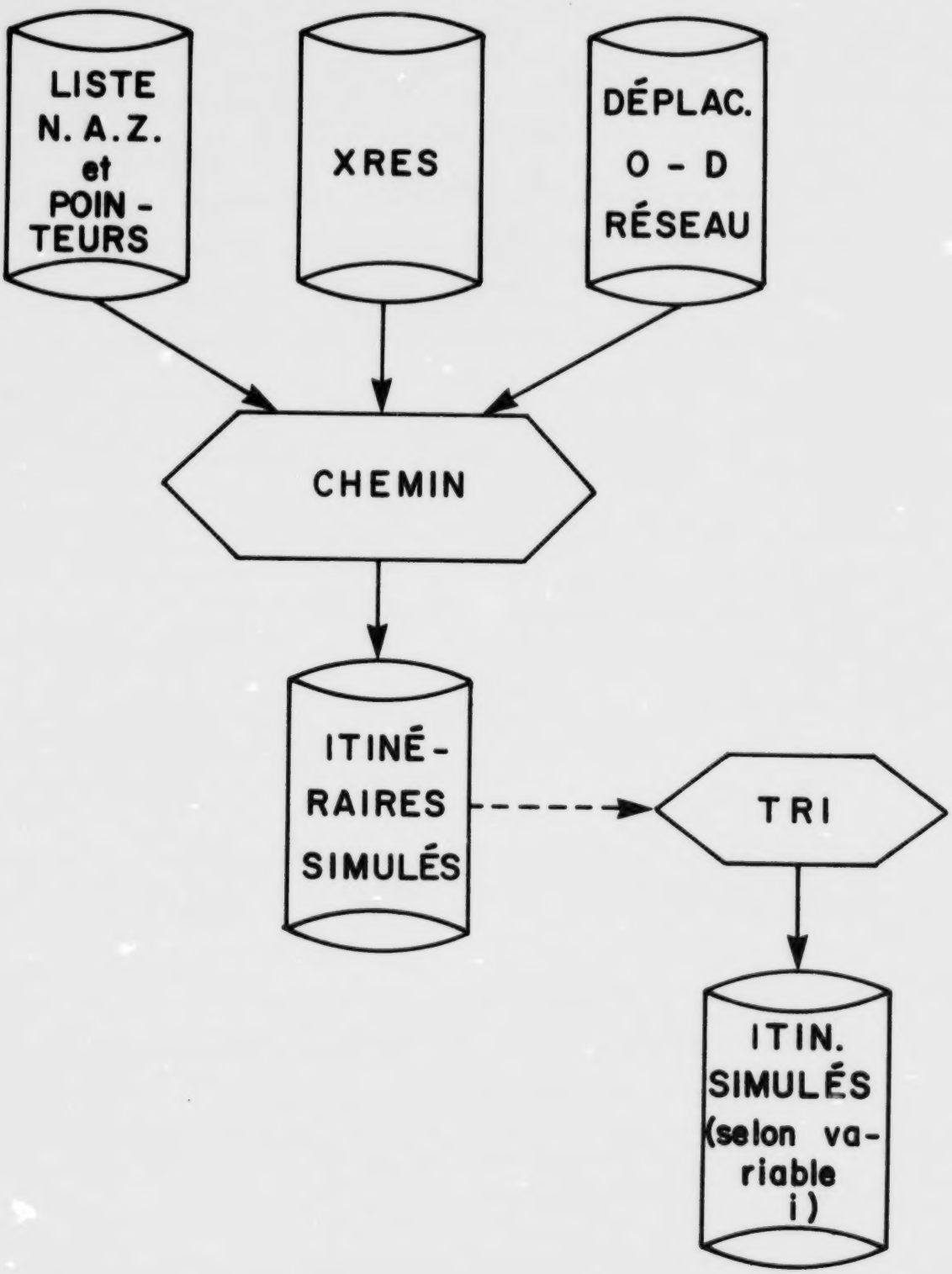


FIG. 6.4 – SCHÉMA DU MODULE CHEMIN

et l'activité des zones sont supposées être concentrées aux centroïdes, l'entrée du module DIVERSION est constituée seulement du fichier d'itinéraires simulés. Dans le cas contraire (population et activité réparties à l'intérieur des zones), il requiert, comme on le verra, des données additionnelles concernant cette distribution. La figure 6.5 présente un schéma du module DIVERSION.

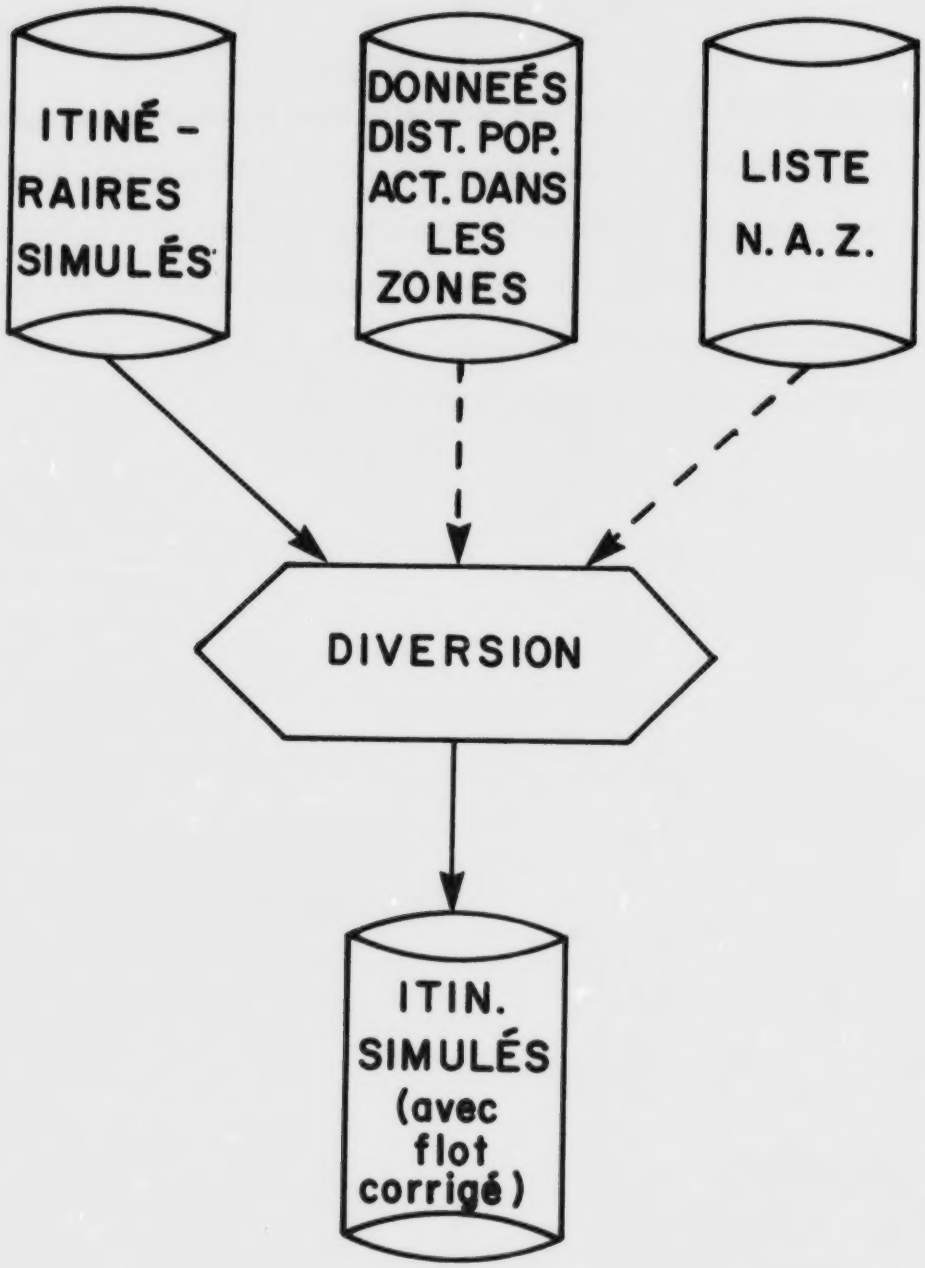


FIG. 6.5 – SCHÉMA DU MODULE DIVERSION

f) Le module CHARGE

Le module de chargement que nous utilisons est celui du modèle TRANSCOM, tel qu'implanté à la C.T.C.U.M. Il réalise l'affectation des passagers le long des trajets qui ont été sélectionnés par l'algorithme de cheminement, selon les flots calculés par le module DIVERSION. Les résultats produits par le module CHARGE sont très variés. On distingue entre autres (Chapleau, 1974):

- fichier STATOR: qui contient des statistiques permettant d'évaluer le comportement des usagers et le niveau de service à chacun des noeuds considérés comme origines;

- fichier FLOT: qui décrit la circulation complète des passagers sur le réseau; on y retrouve la charge des liens le long des lignes ainsi que les mouvements des usagers en chacun des noeuds;

- Listing contenant des statistiques générales pour l'ensemble des déplacements, distribution des distances et des temps de voyage, compte des entrants et des sortants pour le mode métro, ainsi que des statistiques relatives aux fichiers précédents.

La figure 6.6 présente un schéma des entrées et sorties de ce module.

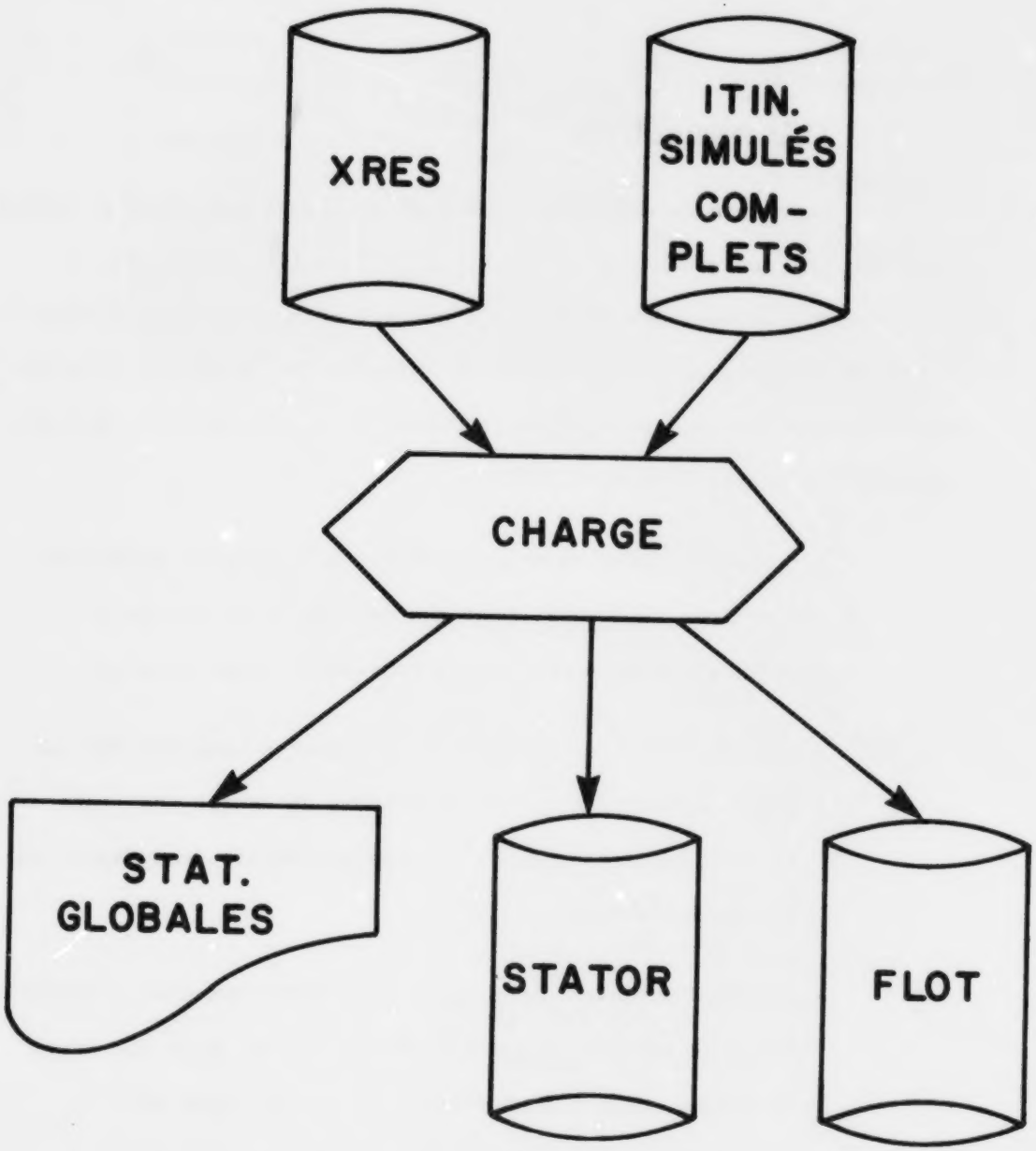


FIG. 6.6 – SCHÉMA DU MODULE CHARGE

6.3 L'accès au réseau de transport en commun

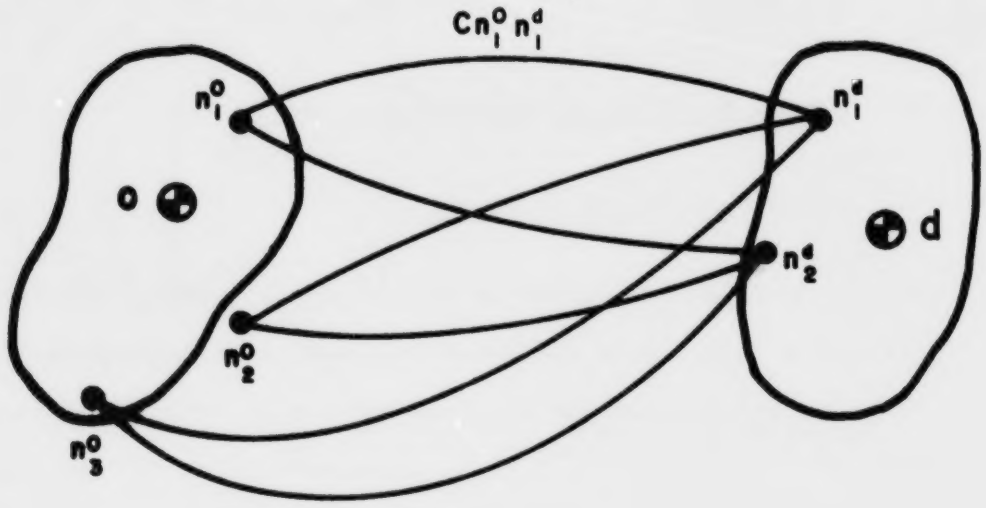
6.3.1 Formulation du problème

Soit R=(N,A) un réseau de transport en commun, où N représente l'ensemble de noeuds et A l'ensemble d'arcs, et z une zone quelconque de la région desservie par le réseau mentionné. Nous sommes intéressés à déterminer l'ensemble N^z , sous-ensemble de N, tel que chaque $n_i^z \in N^z$ soit un noeud potentiel d'entrée ou de sortie du réseau R=(N,A) pour les voyageurs qui commencent ou qui terminent leurs déplacements dans la zone z. Nous donnerons à ces noeuds le nom générique de "noeuds d'accès potentiels". Dans notre approche, les vrais noeuds d'accès sont déterminés à l'étape de diversion de chemins entre paires de zones. A ce moment-là, pour une paire de zones origine-destination (o,d) on doit calculer la probabilité que chaque "chemin potentiel" entre "o" et "d" a d'être emprunté. Ainsi, si k et ℓ représent le nombre de noeuds d'accès potentiel des zones o et d respectivement, l'ensemble C des "chemins potentiels" sera:

$$C = \{ c^{o}_{n_i, n_j^d} \mid n_i^o \in N^o \wedge n_j^d \in N^d \ , \ i=1,2...k \ \text{ et } \ j=1,2...\ell \}$$

Comme on l'a déjà dit, tous ces chemins sont des chemins d'impédance minimale sur le réseau R=(N,A).

La figure 6.7 montre ce qu'on vient de décrire.



$N^o = \{n^o_1, n^o_2, n^o_3\}$ $\qquad$ $N^d = \{n^d_1, n^d_2\}$

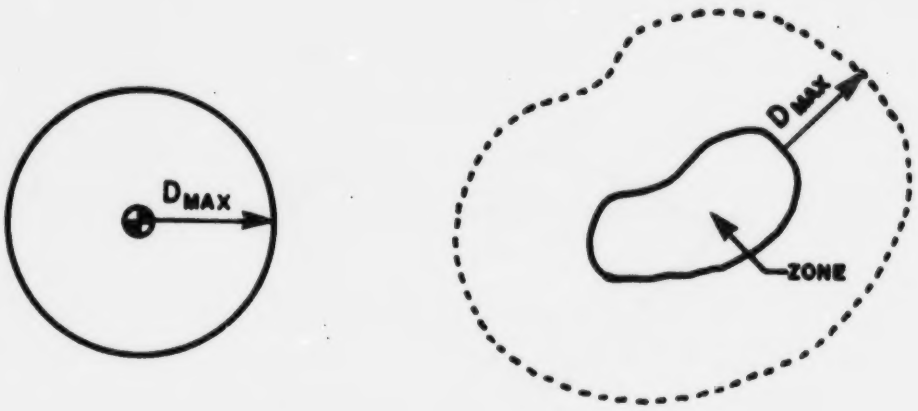
$C = \{Cn^o_1 n^d_1 , Cn^o_1 n^d_2 , Cn^o_2 n^d_1 , Cn^o_2 n^d_2 , Cn^o_3 n^d_1 , Cn^o_3 n^d_2\}$

Figure 6.7 Noeuds d'accès potentiels et chemins potentiels entre paires de zones.

6.3.2 Détermination des noeuds d'accès potentiels d'une zone

Chriqui (1974) définit la notion de "bassin de drainage" d'une ligne de transport en commun, et tout centroïde à l'intérieur de ce bassin est considéré comme ayant accès à cette ligne. Notre approche, comme celle du modèle TRANSEPT, consiste à chercher les noeuds (ou les liens) à l'intérieur d'une région entourant la zone. Nous définissons une "région d'accès d'une zone" (R_A) et tout noeud à l'intérieur de cette région sera un noeud d'accès potentiel de la zone.

Dépendant des hypothèses sur la distribution de la population (et des activités) d'une zone, cette région d'accès R_A pourrait être définie de deux façons différentes. Lorsqu'on suppose qu'il existe une limite (D_{max}) pour la distance de marche entre les origines (destinations) et les points d'entrée (sortie) au réseau de transport en commun, dans le cas où la population (activité) est supposée être concentrée aux centroïdes des zones, R_A sera un cercle de rayon D_{max} autour des centroïdes (voir figure 6.8.a). Par contre, si l'on suppose que la population (activité) d'une zone est répartie sur toute la surface de la zone, la région R_A sera de la forme montrée dans la figure 6.8.b.



a) Population (activité) au centroïde. Cas 1

b) Population (activité) répartie dans la zone. Cas 2

Figure 6.8 Région d'accès (R_A) d'une zone

6.3.2.1 Détermination de la région d'accès, R_A

Dans le cas 1 (population et activités concentrées aux centroïdes), la détermination de la région d'accès, R_A, devient très simple. Il suffit de connaître les coordonnées des centroïdes des zones et la valeur de D_{max}. La région R_A sera alors un cercle centré au centroïde, de rayon D_{max}.

Le cas 2, par contre, est un peu plus compliqué et requiert plus de données. D'abord il faut connaître le contour des zones. Souvent ces contours sont des lignes courbes qui ne peuvent pas être représentées mathématiquement. Baass (1979) approxime ces contours par des lignes droites tout en restreignant le nombre de sommets au minimum nécessaire (voir figure 6.9).

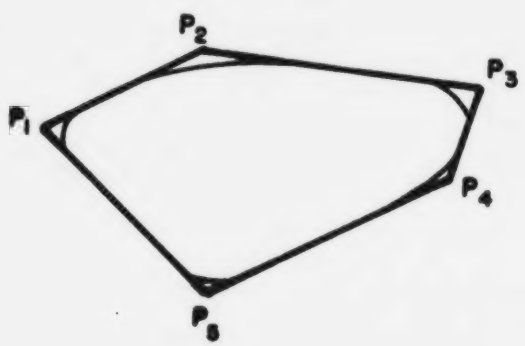
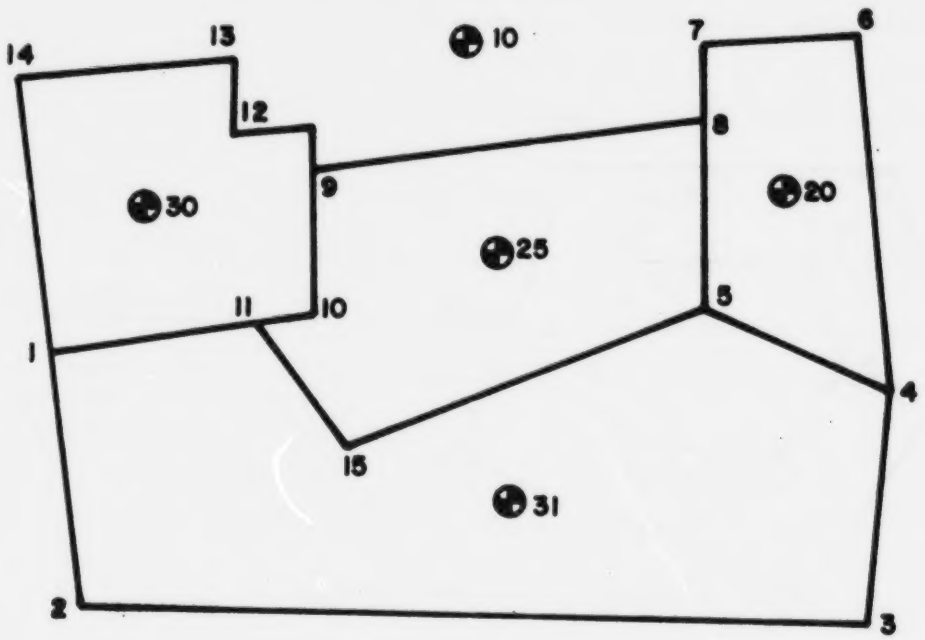


Figure 6.9 Approximation du contour d'une zone.

De cette façon, la zone de la figure 6.9 est complètement définie par les coordonnées de points P_1, P_2... P_5 . Une fois qu'à chaque sommet on y affecte un numéro, la quantité minimale d'information à codifier est donnée par les coordonnées des points et les frontières entre paires de zones.



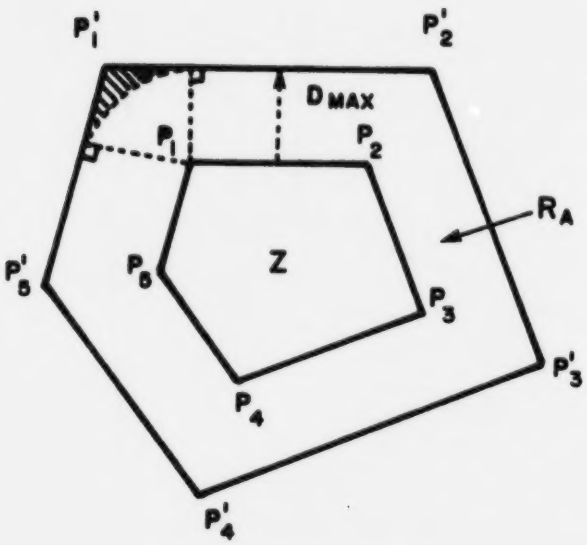
Données d'entrée:

Zone	Zone	No. Points (sur la frontière)	Sommets
10	25	2	9,8
20	25	2	8,5
25	31	3	5,15,11
25	30	3	11,10,9

Figure 6.10 Exemple de codification des frontières des zones

Baass (1979) mentionne que pour les quelques 1000 zones de l'Ile de Montréal (découpage zonal 1974) 2530 frontières ont été codifiées et que les contours de zones ont été définis par la codification de 2430 points.

Une fois le contour d'une zone connu, la région R_A est approximée par un polygone dont le contour est parallèle à celui de la zone, comme indiqué dans la figure 6.11.



Z est défini par:

$\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$

R_A est défini par:

$\{P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5\}$

Figure 6.11 Région d'accès d'une zone Z avec population et activité distribuées en son intérieur.

Comme on l'a déjà souligné, R_A est une approximation de la région d'accès qui résulte des deux hypothèses suivantes:

a) Population et activité distribuées sur toute la surface de la zone.

b) Les voyageurs marchent une distance maximale D_{max} .

D'après ces hypothèses il y a, dans les alentours des points P'_i , une petite région qui ne devrait pas être à l'intérieur de R_A (voir surface hachurée près de P'_1). La simplification est faite afin de rendre plus efficace la recherche des noeuds à l'intérieur de R_A.

6.3.2.2 Recherche des noeuds d'accès potentiel d'une zone

a) Région d'accès circulaire

Dans ce cas, la recherche des noeuds d'accès potentiel est assez simple. Pour chaque noeud n_i de l'ensemble N de noeuds du réseau, avec coordonnées (x_i,y_i), il suffit de vérifier l'expression suivante:

$$(x_i-x_o)^2 + (y_i-y_o)^2 \leqslant D^2_{max} \qquad (6.1)$$

où x_o,y_o sont les coordonnées du centroïde de la zone considérée.

Cependant, étant donné qu'on travaille avec une simplification du réseau réel, où on essaie de minimiser le nombre de noeuds, ces derniers ne représentent pas tous les points d'entrée ou de sortie du réseau de transport en commun. En effet, pour les lignes de surface, un lien entre deux noeuds consécutifs peut contenir plusieurs arrêts. C'est pour cela que si un lien (a,b), ou une partie de lui, est à l'intérieur de R_A la zone considérée aura accès aux lignes qui passent par (a,b), même si ses noeuds extrêmes a et b sont à l'extérieur de R_A. La figure 6.12 montre une situation où il n'y a pas de

noeuds à l'intérieur de R_A. Cependant il est clair que les voyageurs ont accès à la ligne ℓ_1, au lien (n_1,n_2)

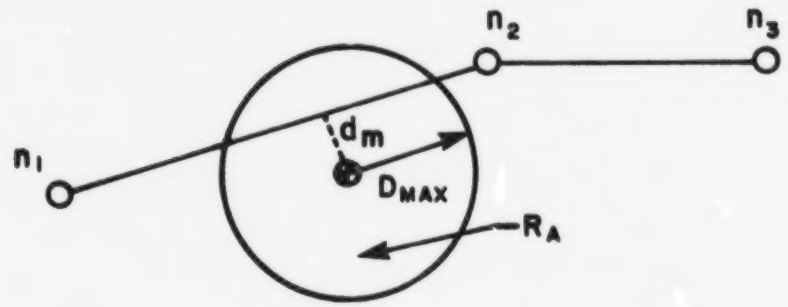


Figure 6.12 Exemple d'accès à un lien

Pour résoudre ce type de problème produit par la codification simplifiée du réseau, nous devons examiner d'abord une région R_c , un cercle concentrique avec R_A , de rayon plus grand que D_{max} , afin de nous assurer qu'un lien avec une partie à l'intérieur de R_A (et ses noeuds extrêmes à l'extérieur) ait au moins un noeud en dedans de R_c. La longueur du rayon de R_c dépend de la longueur du lien accessible, le plus long du réseau (L_{max}) et de la distance maximale de marche D_{max} (voir figure 6.13).

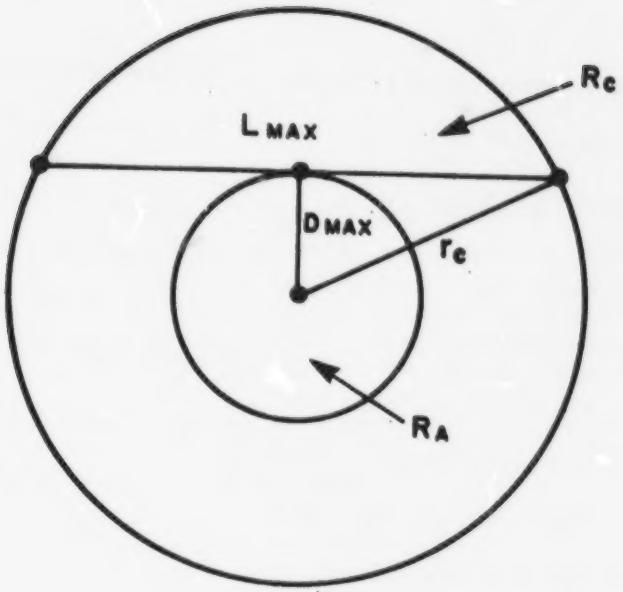


Figure 6.13 Région d'accès potentiel (R_A) et région de noeuds candidats (R_c)

La figure 6.13 montre que si L_{max} est la longueur du lien accessible le plus long du réseau et D_{max} le rayon de R_A , le rayon r_c de la région R_c sera:

$$r_c = 1/2\sqrt{L_{max}^2 + 4D_{max}^2} \qquad (6.2)$$

Il est clair que tout lien du réseau, ayant une portion à l'intérieur de R_A et ses deux noeuds extrêmes à l'extérieur, aura au moins un noeud à l'intérieur de la région R_c de rayon r_c tel que défini par l'expression (6.2). L'algorithme de recherche des noeuds (ou liens) d'accès potentiel d'une zone Z , est alors très simple.

Il peut se résumer de la façon suivante:

Variables à utiliser

NNODE = nombre de noeuds du réseau

L(K) = ensemble de liens "candidats" (les deux noeuds extrémités à l'extérieur de R_A)

NLIEN = nombre d'éléments de L(K)

R_C = région des noeuds "candidats"

R_A = région d'accès potentiel

Z = numéro de la zone à l'étude.

Résumé de la procédure

- pour k=1,NNODE
  - * Le noeud k, est-il à l'intérieur de R_C ?
    - . NON : . aller à β
    - . OUI : . continuer
  - * Le noeud k, est-il à l'extérieur de R_A ?
    - . NON : . k devient noeud d'accès de Z
      - . aller à β
    - . OUI : . continuer
  - * pour J=1,NLIEN
    - . Le lien J, traverse-t-il R_A ?
      - . NON : aller à α
      - . OUI : . Est-il déjà un lien d'accès potentiel de Z
        - . NON : . J devient lien d'accès de Z
          - . aller à α
        - . OUI : . aller à α

α * Continuer

β - Continuer

Cette détermination des liens d'accès et la création de la liste N.A.Z. sont discutées par la suite d'une façon plus détaillée.

i) Détermination d'un lien d'accès

Cette étape de l'algorithme consiste à analyser si un lien "candidat" (lien avec un noeud dans l'anneau formé par R_A et R_c et l'autre à l'extérieur de R_A) traverse ou non la région d'accès R_A. Les coordonnées des noeuds n_1 et n_2 étant connues, ainsi que celles du lien candidat, on calcule la distance "d" entre le centroïde de la zone Z et la ligne droite passant par n_1 et n_2. Si "d" est plus grande que D_{max} (distance de marche maximale) le lien candidat (n_1, n_2) est rejeté. Dans le cas contraire il faut tester si le point d'intersection I entre la ligne droite passant par n_1 et n_2 et une droite perpendiculaire à cette dernière, passant par le centroïde de Z se trouve entre n_1 et n_2. La figure qui suit présente des exemples d'acceptation et de rejet des liens "candidats".

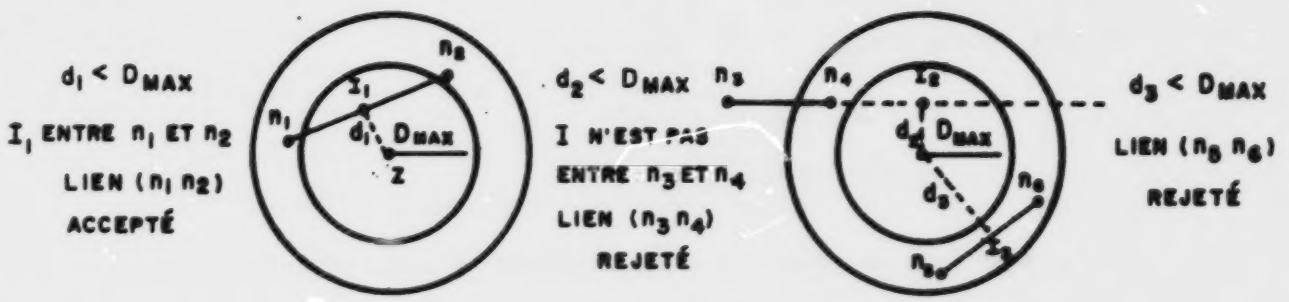


Figure 6.14 Exemples d'acceptation et de rejet des liens "candidats"

ii) Création de la liste "noeuds d'accès des zones" (N.A.Z.)

Comme on l'a déjà souligné, le but du module d'accès est de construire et de transmettre aux modèles suivants, une liste ("liste des noeuds d'accès des zones") contenant les noeuds (ou les liens) d'accès potentiel des zones et les temps d'accès respectifs. Ainsi, pour cette liste on retrouve à l'adresse k (k allant de 1 jusqu'au nombre de noeuds d'accès):

NODAC (k) : identification interne d'un noeud d'accès

ACT (k) : temps d'accès associé.

Pour savoir à quelle zone est associée l'information indiquée, on aura préalablement conservé l'adresse de cette liste où se retrouve le premier noeud d'accès de la zone Z:

NAC (Z) : adresse dans la liste N.A.Z., du premier noeud d'accès potentiel de la zone Z.

Ainsi, pour chercher les noeuds d'accès de la zone Z, on doit d'abord déterminer:

k_1 = NAC (Z)

k_2 = NAC (Z+1)

Si $k_1 = k_2$, la zone Z n'a pas de noeuds d'accès potentiel. Par contre, si $k_2 > k_1$, les noeuds d'accès potentiel de Z se retrouvent dans la liste N.A.Z. entre les adresses k_1 et (k_2-1). L'exemple qui suit illustre ce qu'on vient de décrire. Soit une région d'étude

divisée en cinq zones, dont les noeuds et les temps d'accès sont les suivants:

Zone	Noeuds d'accès	Temps d'accès
1	5-6-9-8	4-5-6-7
2	8-10-12	3-5-6
3	-	-
4	15-16-18	4-7-8
5	16-20	6-10

La liste N.A.Z. sera alors:

Adresse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NODAC	5	6	9	8	8	10	12	15	16	18	16	20
ACT	4	5	6	7	3	5	6	4	7	8	6	10

et les pointeurs donnant le premier noeud d'accès potentiel de chaque zone se retrouvent dans le vecteur NAC :

Zone	1	2	3	4	5	6
NAC	1	5	8	8	11	13

Un élément du vecteur NODAC peut être un lien ou un noeud. Dans le cas où il est un lien, il est exprimé d'une façon condensée en fonction de ses noeuds extrémités. Supposons un lien, LIEN, formé des noeuds n_1 et n_2 , dans un réseau où le nombre total de noeuds est NNODE. Il sera exprimé comme suit:

$$LIEN = n_1 . (NNODE+1) + n_2$$

Les modules suivants, quand ils retrouvent un noeud d'accès potentiel dont son numéro est plus grand que NNODE, ils "reconnaîtront" qu'il s'agit d'un lien et ils le traiteront en conséquence.

Finalement, il faut mentionner que dépendant des caractéristiques du réseau, de la région d'étude (nombre de zones principalement), des rayons des régions R_A et R_c , le nombre d'éléments dans la liste N.A.Z. pourrait être trop grand, ce qui pourrait poser des problèmes concernant la mémoire d'ordinateur requise. Comme prévention à ce problème, le modèle permet que l'utilisateur fixe le nombre maximal (M) de noeuds d'accès potentiel d'une zone. Alors, tous les noeuds d'accès potentiel trouvés pour une zone donnée sont d'abord gardés dans un vecteur provisoire. Après il sont triés selon le temps d'accès. Si le nombre des noeuds dans ce vecteur trié est plus petit que le maximum fixé, tous sont copiés sur NODAC. Par contre, s'il est plus grand, seulement les premiers M noeuds seront copiés sur NODAC.

b) Région d'accès polygonale

Trois différences se présentent, principalement, par rapport au cas précédent.

i) La procédure pour déterminer si un point se trouve ou non à l'intérieur d'une région donnée est plus com-

plexe quand il s'agit d'un polygone que d'un cercle. Baxter (1976) présente plusieurs méthodes alternatives. Nous avons choisi celle des "intersections topologiques" qui a été prouvée comme très efficace. La méthode consiste à tracer des lignes droites à partir des points analysés et à compter le nombre de fois qu'ils intersectent un côté du polygone. Si ce nombre est impair le point est à l'intérieur, autrement, il est à l'extérieur.

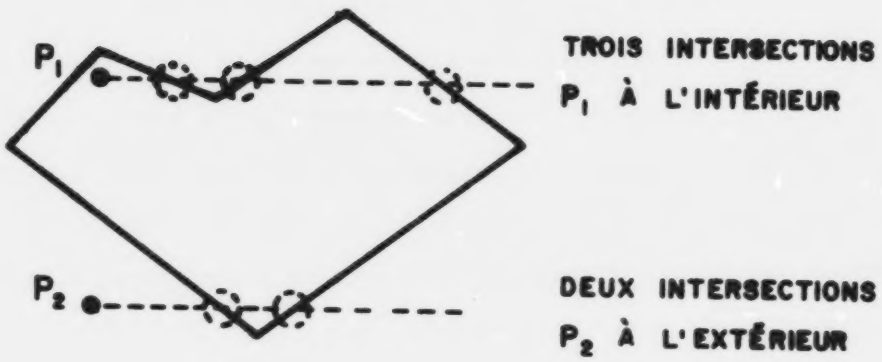


Figure 6.15 Recherche de points à l'intérieur d'un polygone. Méthode des intersections topologiques. Baxter (1976).

ii) Si la région R_A est polygonale, la méthode pour déterminer si un lien (n_1,n_2) la traverse, est aussi différente. Dans ce cas on génère des points intermédiaires entre les noeuds extrémités du lien à l'étude (simulant des arrêts d'autobus), et on vérifie, au moyen de la méthode des

intersections topologiques, si au moins un de ces points (noeuds fictifs) se trouve à l'intérieur de la région d'accès potentiel.

iii) La troisième différence concerne le calcul des temps d'accès. Dans le premier cas où la population et l'activité d'une zone sont supposées concentrées en son centroïde, ils se calculent à l'étape de l'ACCES, comme une fonction des distances entre les noeuds (ou liens) et les centroïdes. Par contre, si la population et l'activité d'une zone sont supposées réparties dans la zone, un tel calcul des temps d'accès manque de sens. Dans cette situation, des temps moyens d'accès sont calculés à l'étape de DIVERSION.

Malgré ces trois différences, la structure informatique du module d'accès demeure la même. C'est-à-dire, une liste N.A.Z. est créée, à laquelle on associe le vecteur NAC contenant les pointeurs donnant l'adresse du premier noeud (ou lien) d'accès potentiel de chaque zone. A cette étape les temps d'accès contenus en ACT sont tous zéro.

6.4 Les algorithmes de cheminement

6.4.1 L'algorithme C.T.M. modifié (CHPC)

L'algorithme C.T.M. (voir Chriqui, 1974) détermine l'arbre des chemins d'impédance minimale à partir d'un noeud donné. Dans notre

cas, on vient de voir que l'origine d'un arbre peut être un noeud ou un lien. L'algorithme que nous décrivons par la suite s'adapte à cette situation. Soit:

T(I,J) = temps total de déplacement (temps d'attente, le temps de pénalité, temps de parcours en véhicule) entre les noeuds I et J.

TD(I,J,L) = temps de parcours entre I et J par la ligne L.

TA(L) = temps d'attente (pénalité incluse) de la ligne L.

H(K) = ensemble de noeuds du réseau accessible du noeud (ou lien) K, sans faire de correspondance.

B(K) = ensemble de lignes passant par le noeud (ou lien) K.

Lors de l'application de l'algorithme, tout noeud J du réseau reçoit des étiquettes de la forme:

[T(IBAS,J),K,L] où

T(IBAS,J) = temps total de déplacement entre l'origine de l'arbre, IBAS et J.

K = noeud du réseau où a lieu le dernier transfert sur le chemin de IBAS à J.

L = ligne empruntée au noeud K pour aller à J.

L'origine IBAS peut être un lien (N1,N2) codifié de la façon suivante:

IBAS = N1*(NNODE+1) + N2

où NNODE représente le nombre de noeuds du réseau.

L'algorithme peut se résumer comme suit:

ETAPE 1 : Initialisation

. Tous les noeuds reçoivent l'étiquette [∞,0,0]

. X=∅ ensemble des noeuds avec une étiquette permanente

. IPIVOT=IBAS

ETAPE 2 : Etiquetage des noeuds accessibles directement à partir de IBAS

. Si IBAS > NNODE aller à α

. Donner à IBAS l'étiquette permanente [0,IBAS,0]

. X = X U{IBAS}

. Pour chaque ligne L ∈ B (IBAS)

. Pour chaque noeud J ∈ L

. Y = TA(L) + TD(IBAS,J,L)

. Donner à J l'étiquette provisoire [Y,IBAS,L]

. Continuer

. Aller à l'étape 3

α . Pour chaque ligne L ∈ B (IBAS)

. Pour chaque noeud J de L atteint de IBAS en sens aller

. Y = TA(L) + TD(N2,J,L) (1)

. Donner à J l'étiquette provisoire [Y,IBAS,L]

. Continuer

. Pour chaque noeud J de L, atteint de IBAS en sens retour

. Y = TA(L) + TD(N1,J,L) (1)

. Donner à J l'étiquette provisoire [Y,IBAS,L]

. Continuer

ETAPE 3 : Détermination d'un nouveau noeud IPIVOT

. Déterminer le noeud K tel que

$T(IBAS,K) = \min \{T(IBAS,J), \forall J \in \bar{X}\}$

. IPIVOT = K

ETAPE 4 : Etiquetage des noeuds accessibles directement à partir de IPIVOT

. Si B(IPIVOT) contient une seule ligne, aller à l'étape 5

. Pour chaque ligne $L \in B$ (IPIVOT), différente de la ligne d'arrivée à IPIVOT

. Pour chaque noeud $J \in L$

. $Y = T(IBAS,IPIVOT) + TA(L) + TD(IPIVOT, J, L)$

. si $Y \geq T(IBAS,J)$ aller à β

. Donner à J l'étiquette provisoire [Y, IPIVOT, L]

β . CONTINUER

. L'étiquette de IPIVOT DEVIENT PERMANENTE

ETAPE 5 : Test d'arrêt $X = X \cup \{IPIVOT\}$

. si $X = \emptyset$ arrêter

. Aller à l'étape 3

---

(1) Si, pour une ligne à deux terminus T1 et T2, le sens aller est défini de T1 à T2, N1 représente le noeud du lien IBAS, le plus proche de T1 et N2 le plus proche de T2. On doit noter que cela ne correspond pas nécessairement à la décodification du lien IBAS, N1 et N2 pouvant être inversés pour des lignes différentes passant par le lien.

6.4.2 L'algorithme SIMITI (SIMule ITInéraires)

SIMITI permet de déterminer le chemin d'impédance minimale entre une paire origine-destination du réseau de transport en commun. Ces origines et destinations peuvent être des noeuds ou des liens. Si sur une section d'un chemin il existe des lignes communes, la version actuelle choisit seulement la plus rapide.

Une fois créé l'arbre des chemins d'impédance minimale à partir d'une origine IBAS, à l'aide de l'algorithme CTM modifié, SIMITI examine cet arbre pour reproduire le chemin entre l'origine et la destination choisies. Si cette destination correspond à un noeud, la tâche est très simple. En effet, en partant de la destination, l'étiquette du noeud donne:

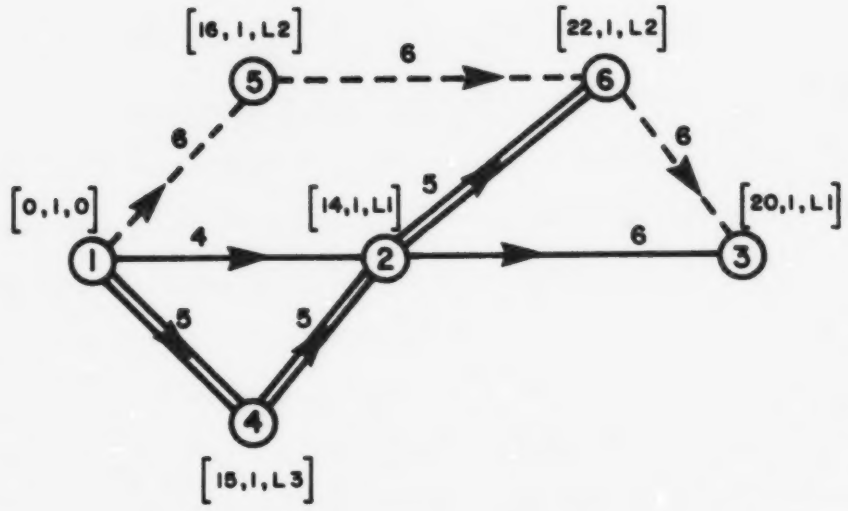
- le temps total de l'origine IBAS jusqu'au noeud examiné,
- le noeud où la dernière correspondance a été faite (J),
- la dernière ligne de l'itinéraire.

L'étiquette du noeud J nous donne l'information sur l'avant-dernière ligne empruntée (si elle existe). La recherche se termine quand l'origine de l'arbre est trouvée.

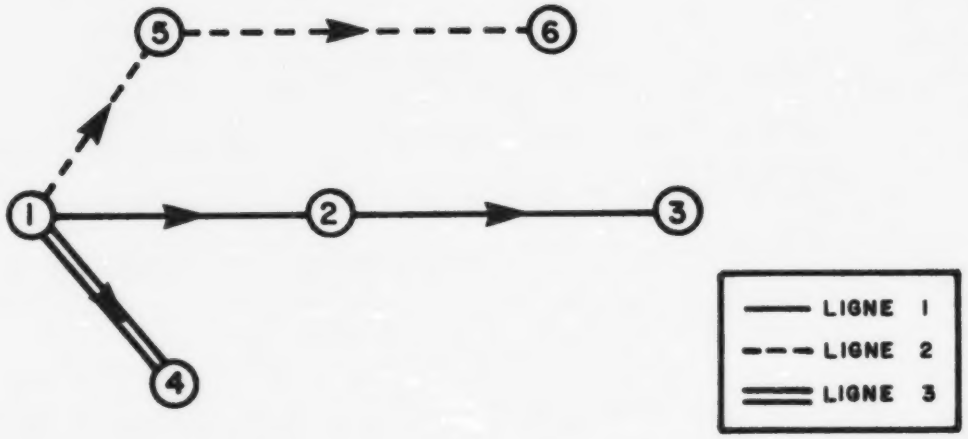
Si la destination du déplacement à l'étude est un lien, l'obtention du chemin d'impédance minimale ne peut pas se faire à partir de l'arbre seulement. Comme on l'a vu lors de la description de l'algorithme CTM modifié, uniquement les noeuds du réseau reçoivent une

étiquette. Il faut alors "fabriquer" une étiquette pour le lien de destination. Cela peut se faire après la construction de l'arbre de chemins d'impédance minimale. Si le lien de destination du déplacement appartient à l'arbre de chemins le plus court, la solution est évidente. S'il n'appartient pas à cet arbre il suffira d'examiner tous les noeuds du réseau à partir desquels le lien de destination peut être atteint, déterminer l'étiquette du lien dans chaque cas et garder, lors de cette analyse, celle du plus petit temps total de voyage entre l'origine IBAS et le lien en question. Dans le cas où l'origine IBAS est aussi un lien, il faut finalement vérifier si le lien de destination peut être atteint directement (en empruntant une seule ligne) à partir de l'origine. Dans le cas affirmatif, pour chaque chemin direct possible on doit déterminer une étiquette pour le lien de destination et la comparer avec l'étiquette courante. Celle du plus petit temps de voyage doit être gardée. La détermination du chemin complet ainsi que des temps associés se fera alors de la même façon que dans le cas précédent, cette fois-ci, à partir de l'arbre de chemins d'impédance minimale et de l'étiquette du lien de destination.

L'exemple de la figure 6.16 sert à illustrer la procédure décrite. La figure 6.16a représente un réseau simple comportant trois lignes de transport en commun et six noeuds. Le temps d'attente de chaque ligne est de 10 min. et les temps de parcours en véhicule sont indiqués (en minutes) sur les liens. La figure 6.16b représente l'arbre de chemins les plus courts à partir de l'origine 1 .



(a) RÉSEAU EXEMPLE



(b) ARBRE DE CHEMINS LES PLUS COURTS
À PARTIR DU NOEUD (1)

FIG. 6.16 – RÉSEAU EXEMPLE, POUR ILLUSTRER L'ALGORITHME SIMITI.

Supposons d'abord que le lien de destination est 2 - 3 . Il appartient à l'arbre. Le chemin le plus court est alors:

- Ligne 1 entre 1 et le lien 2 - 3 et le temps total est de 14 minutes (1).

Si le lien de destination est 2 - 6 la solution est moins simple. Ce lien n'appartient pas à l'arbre. On doit examiner alors tous les noeuds de la ligne L3 (passant par le lien) à partir desquels le lien peut être atteint (ces noeuds étant 1 , 4 et 2). Si la ligne utilisée pour arriver à un de ces noeuds à partir de l'origine est la même qui doit être empruntée pour atteindre le lien de destination, il est négligé. Dans notre cas on examine alors les noeuds 1 et 2 seulement.

- Le temps total entre 1 et le lien 2 - 6 sur la ligne L3 est de 20 minutes.
- Le temps total entre 1 et le lien 2 - 6 sur la ligne L1 à partir de 1 avec une correspondance à la ligne L3 au noeud 2 est de 24 minutes.

Le chemin le plus court entre l'origine 1 et le lien 2 - 6 s'obtient alors en empruntant la ligne L3 au noeud 1 .

---

(1) On suppose que le temps de voyage sur le lien est nul.

6.4.3 Réseau exemple: accès aux noeuds vs accès aux liens

L'exemple que nous présentons aux figures 6.17 et 6.18 illustre l'effet que le type d 'accès au réseau peut avoir sur le choix du chemin d'un voyageur. Le réseau comporte douze noeuds et quatre lignes de transport en commun, toutes avec un temps d'attente (incluant la pénalité) de dix minutes. Pour rendre l'exemple plus simple, on suppose que les lignes sont unidirectionnelles(s'approchent du noeud 6). Les temps de parcours (en minutes) sont indiqués sur chaque lien.

Supposons un voyageur qui doit se déplacer de la zone o à la zone d. Selon le type d'accès donné, les points d'entrée et de sortie du réseau seront, comme l'indiquent les figures 6.17 et 6.18, les noeuds 2 et 5 (accès aux noeuds à la façon TRANSCOM, par exemple) ou les points o' et d' sur les liens 1 - 2 et 5 - 6 (accès facultatif aux liens). Dans les deux cas les étiquettes définissant l'arbre de chemins d'impédance minimale sont indiquées aux noeuds. En comparant les deux arbres on observe que les itinéraires entre (1,3), (1,4), (1,5), (1,6), (1,10), (1,11) et (1,12) varient d'un cas à l'autre. En ce qui concerne le déplacement entre o et d, quand l'accès est aux noeuds, le voyageur emprunte au noeud 2 la ligne L1, jusqu'au noeud 5 , avec un temps total (sur le réseau) de 28 minutes. Si l'accès se fait aux liens (points o' et d'), le voyageur emprunte au point o' la ligne L2 jusqu'au noeud 2 où il fait correspondance à la ligne L1 pour se rendre au point d'; le temps total de voyage étant de 39 minutes.

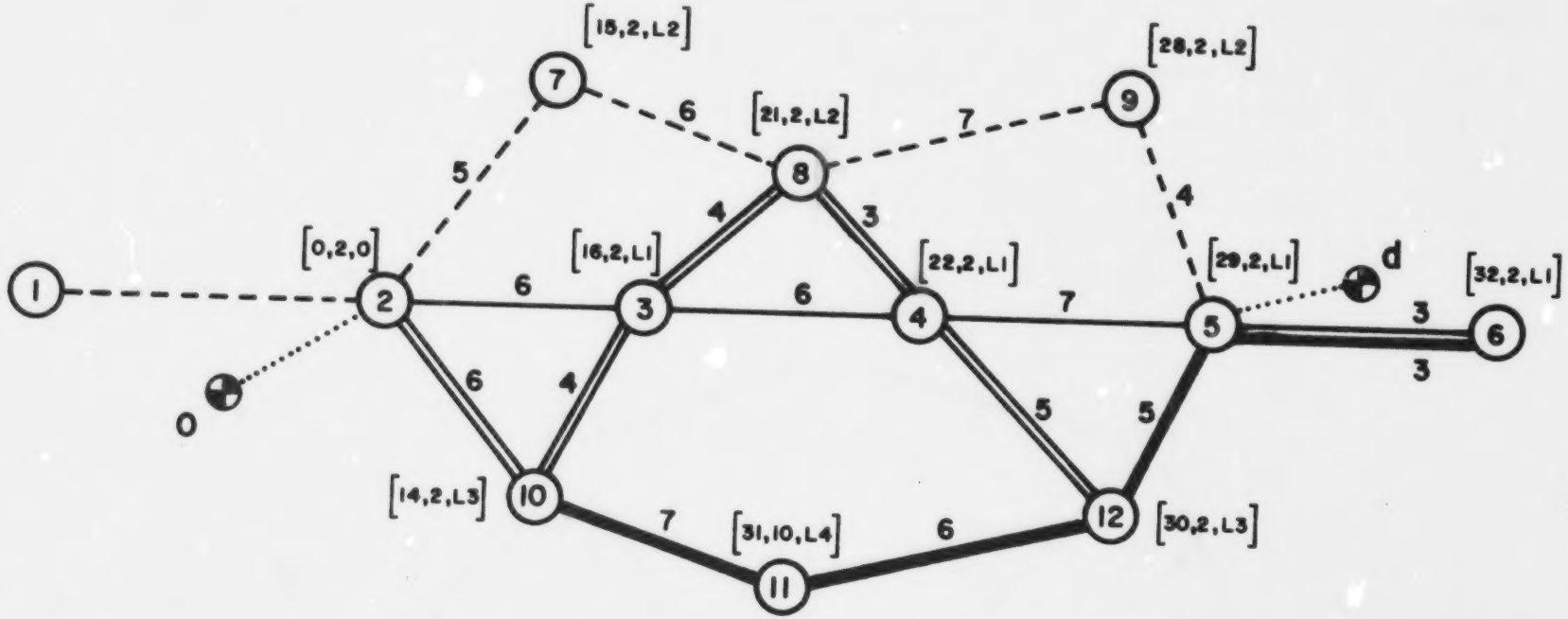


Figure 6.17 Problème exemple: accès aux noeuds

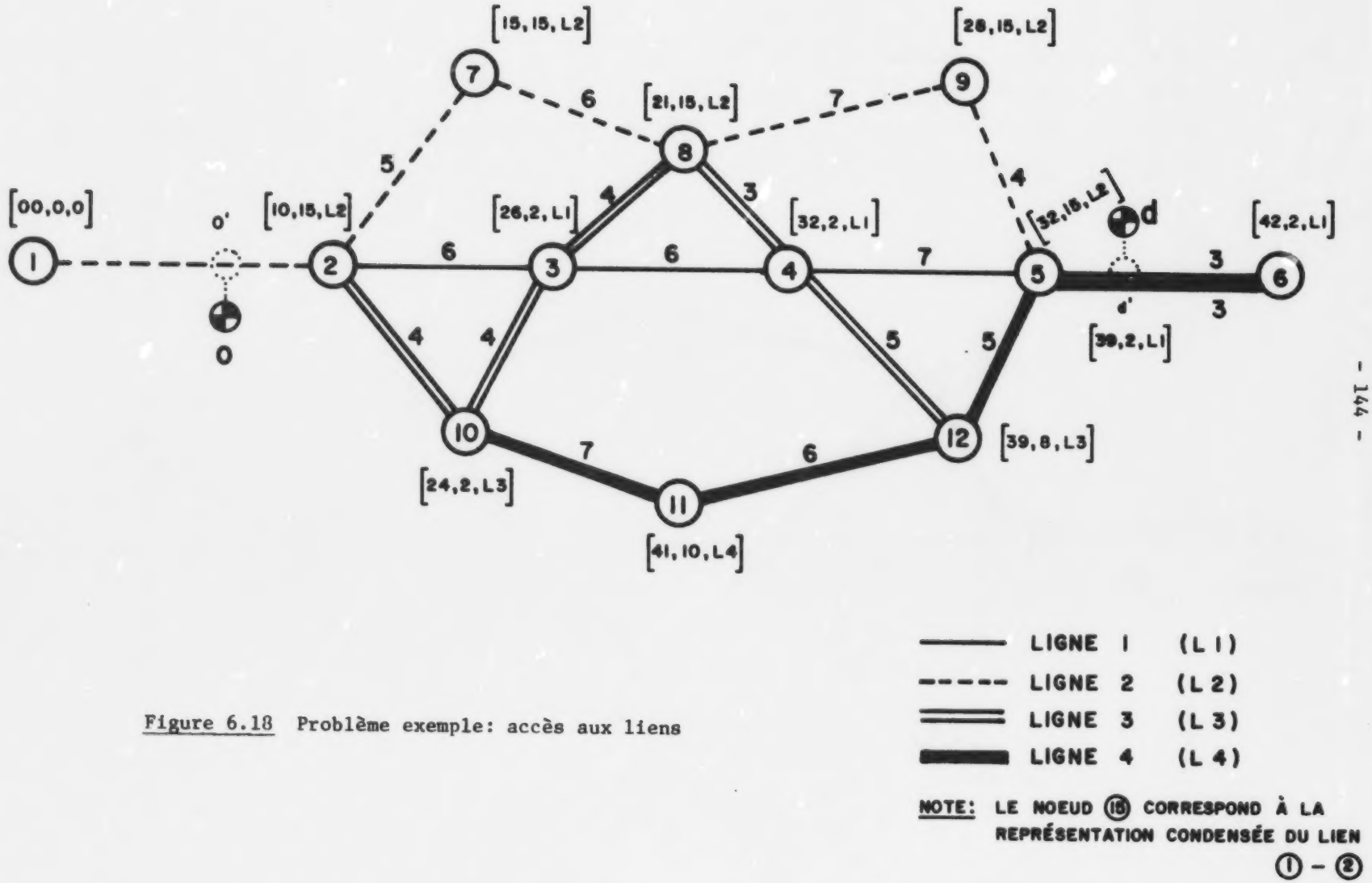


Figure 6.18 Problème exemple: accès aux liens

Comme on l'a vu au chapitre V, la non-reproduction par le modèle (environ 40%) d'une quantité importante d'itinéraires décrits était due à des problèmes similaires à ce qu'on vient de montrer.

6.5 Diversion de chemins entre zones

6.5.1 Formulation du problème

Le problème que nous abordons consiste à produire une répartition du flot entre deux zones parmi un ensemble de chemins possibles, tout en respectant le fait qu'une fois sur le réseau de transport en commun, les voyageurs suivent les chemins d'impédance minimale. Les modèles qui seront présentés ont en commun les hypothèses suivantes:

a) Il existe une distance maximale de marche, D_{max} , pour les usagers accédant à pied au réseau de transport en commun,

b) Si un usager n'a pas d'accès à un noeud à une distance inférieure ou égale à D_{max} , il accédera au noeud le plus proche,

c) Les voyageurs pour se rendre d'un point d'origine à un point de destination, empruntent le chemin d'impédance minimale.

A ces hypothèses communes aux deux modèles présentés dans cette section, il faut ajouter celles concernant la distribution de la population et

de l'activité à l'intérieur des zones. Tout comme dans les modèles d'accès, deux types de suppositions seront faites:

a) La population et l'activité d'une zone se trouvent concentrées en son centroïde.

b) La population et l'activité d'une zone se trouvent réparties uniformément à l'intérieur de la zone.

6.5.2 Population et activité concentrées aux centroïdes des zones

Soit une paire de zones origine-destination (o,d) pour laquelle à l'étape de l'accès on a déterminé les ensembles des noeuds (ou liens) d'accès potentiel, N^o et N^d :

$$N^o = \{n_1^o, n_2^o \ldots n_k^o\}$$

$$N^d = \{n_1^d, n_2^d \ldots n_\ell^d\}$$

Tout individu se déplaçant entre les zones o et d le fera entre les centroïdes, comme l'indique la figure 6.19. Il y aura un ensemble C de chemins alternatifs:

$$C = \{c_{n_i n_j}^{o\,d} | n_i^o \in N^o \wedge n_j^d \in N^d,\ i=1,2\ldots k \text{ et } j=1,2\ldots \ell\}$$

On dénotera X le vecteur des distances entre le centroïde et les noeuds d'accès potentiel de la zone o et Y le vecteur de distances entre le centroïde et les noeuds d'accès potentiel de la zone d.

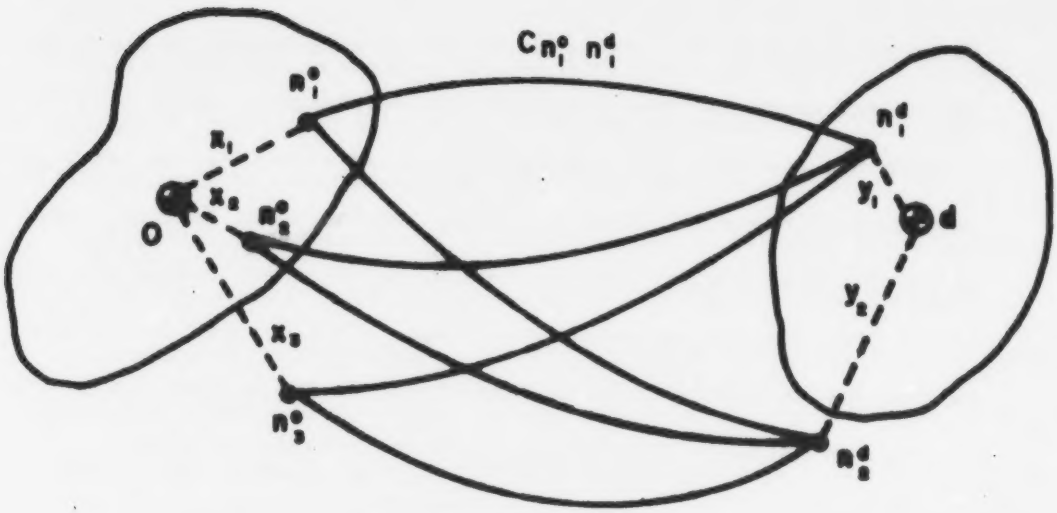


Figure 6.19 Choix de chemins entre deux centroïdes

$$X = \{x_1, x_2 \ldots\ldots x_k\}$$

$$Y = \{y_1, y_2 \ldots\ldots y_\ell\}$$

Le temps total (impédance) de déplacement entre o et d, à travers les noeuds n_i^o et n_j^d (chemin $c_{n_i, n_j}^{o\ d}$) est alors:

$$\bar{t}_{n_i n_j}^{o\ d} = \alpha x_i + T^{*o\ d}_{n_i n_j} + \alpha y_j \qquad (6.3)$$

où:

$T^{*o\ d}_{n_i n_j}$ = temps du chemin d'impédance minimale entre n_i^o et n^d_j

α = paramètre à calibrer qui convertit la distance de marche en unités de temps généralisé (temps perçu).

Si l'on respecte toutes les hypothèses déjà faites, tout le flot entre o et d devrait être affecté au chemin qui minimise l'expression (6.3).

Cependant, on sait que les temps de chaque alternative ne sont pas perçus également par tous les voyageurs se déplaçant entre o et d. D'après nos analyses expérimentales la cause principale de cette perception différente est le fait que les temps d'accès $(\alpha x_i, \alpha y_j)$ sont différents pour chaque individu. Cela, parce qu'en réalité ils n'habitent pas tous aux centroïdes des zones. Pour essayer de corriger ce problème on peut définir le temps total de déplacement entre o et d comme une variable aléatoire $(t^{o\,d}_{n_i n_j})$ de la façon suivante:

$$t^{o\,d}_{n_i n_j} = \alpha(x_i + y_j) + T^{*\,o\,d}_{n_i n_j} + \varepsilon^{o\,d}_{n_i n_j} \qquad (6.4)$$

où $\varepsilon^{o\,d}_{n_i n_j}$ est un terme d'erreur aléatoire introduit pour représenter un temps d'accès variable pour chaque individu.

Evidemment si ces termes d'erreur aléatoire pour chaque alternative sont supposés indépendants avec des distributions Weibull identiques, la probabilité $p^{o\,d}_{n_i n_j}$ que le chemin $c^{o\,d}_{n_i n_j}$ a d'être emprunté est donnée par l'expression (6.5):

$$p^{o\,d}_{n_i n_j} = \frac{\exp(\theta_{od}\ \bar{t}^{o\,d}_{n_i n_j})}{\sum_{\forall p,q} \exp(\theta_{od}\ t^{o\,d}_{n_p n_q})} \qquad (6.5)$$

Comme on l'a déjà vu au chapitre III cette formule est obtenue aussi lorsqu'on formule un modèle multichemin de Dial ou un modèle simple d'entropie. Il existe cependant une différence subtile, dépendant de

l'interprétation du terme d'erreur de l'expression (6.4). S'il est interprété comme une mesure de la "mauvaise perception" de la part des usagers du temps de voyage il n'est pas tout à fait clair que le paramètre de diversion θ_{od} doit être différent pour chaque paire de zones. En effet, les applications du modèle multichemin de Dial utilisent une valeur unique. Cependant, si ce terme aléatoire d'erreur est interprété à notre façon, il est clair que le paramètre de diversion doit dépendre, tant de la géométrie des zones que de la disposition spécifique des noeuds d'accès. Cela explique, à notre avis, la nécessité de définir ce paramètre de diversion pour chaque paire de zones. Dans la pratique, cela passe le problème à la phase de calibration de l'expression (6.5).

6.5.3 Population et activité réparties à l'intérieur des zones

Dans ce cas, un déplacement entre les zones d'origine et de destination ne se produit pas entre les centroïdes de ces zones mais entre deux points quelconques (P_x et P_y) à l'intérieur de o et de d respectivement. Les vecteurs des distances X et Y définis précédemment deviennent alors des vecteurs aléatoires.

Il est clair que les vecteurs X et Y sont indépendants. Par contre les éléments de chaque vecteur ne le sont pas (les distances d'un point à des points assez proches peuvent être fortement corrélées).

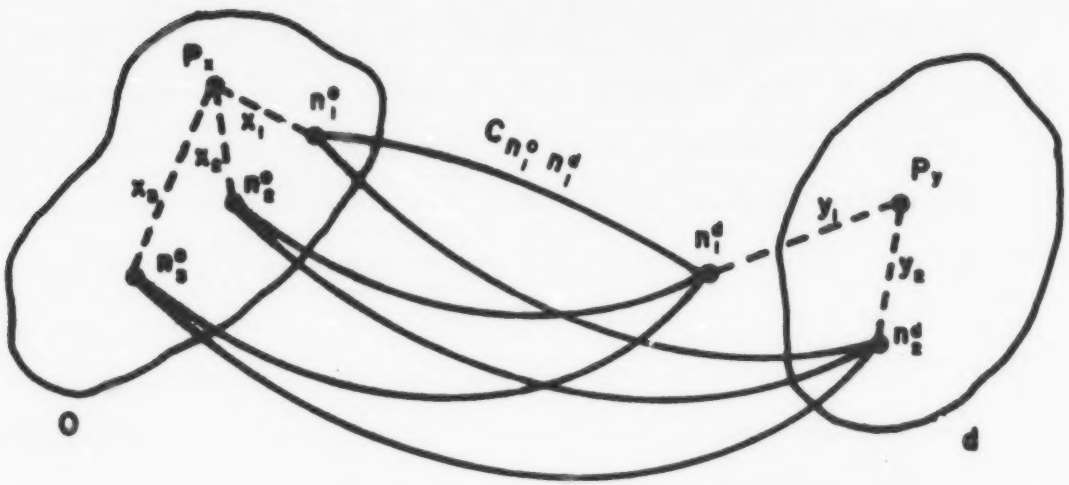


Figure 6.20 Choix de chemins entre deux points aléatoires (P_x, P_y) à l'intérieur des zones o et d.

Lorsqu'on suppose une fonction de distribution de probabilités conjointes donnée pour les vecteurs X et Y, et une distance maximale de marche D_{max}, les probabilités $p_{n_i^o n_j^d}$ associées aux chemins $c_{n_i^o n_j^d}$ doivent se déterminer par simulation. Daganzo et Sheffi, dans une série de travaux (Daganzo, 1977; Daganzo et Sheffi, 1977; Sheffi, 1978, etc.) traitant de ce problème, ont relâché l'hypothèse concernant la distance maximale de marche, ce qui semble juste dans le cas du transport privé.

La probabilité $p_{n_i^o n_j^d}$ peut s'écrire alors:

$$p_{n_i^o n_j^d} = P_r\{t_{n_i^o n_j^d} \leq t_{n_p^o n_q^d},\ \forall\ n_p^o \in N^o\ ,\ \forall\ n_q^d \in N^d\} \qquad (6.6)$$

Ils supposaient, en plus des hypothèses déjà faites, que les fonctions de densité des probabilités conjointes des vecteurs X et Y sont normales multivariées:

$$X \sim MVN\ (E[X]\ ,\ \Sigma x)$$

$$Y \sim MVN\ (E[Y]\ ,\ \Sigma y)$$

où:

$$E\ [X] = \begin{bmatrix} E(x_1) \\ E(x_2) \\ \vdots \\ E(x_k) \end{bmatrix} \qquad \Sigma x = \begin{bmatrix} \sigma x_1^2 & \text{cov}(x_1,x_2) & \dots & \text{cov}(x_1,x_k) \\ & \vdots & & \\ \text{cov}(x_k,x_1) & \text{cov}(x_k,x_2) & \dots & \sigma x_k^2 \end{bmatrix}$$

$$E\ [Y] = \begin{bmatrix} E(y_1) \\ E(y_2) \\ \vdots \\ E(y_\ell) \end{bmatrix} \qquad \Sigma y = \begin{bmatrix} \sigma y_1^2 & \text{cov}(y_1,y_2) & \dots & \text{cov}(y_1,y_\ell) \\ & \vdots & & \\ \text{cov}(y_\ell,y_1) & \text{cov}(y_\ell,y_2) & \dots & \sigma y_\ell^2 \end{bmatrix}$$

Etant donné que la distribution normale multivariée est fermée pour des transformations linéaires du vecteur aléatoire, le vecteur des temps $t_{n_i o n_j d}$ (T^{od}) a aussi une distribution normale multivariée dont les moyennes, variances et covariances sont des fonctions des moyennes, variances et covariances des vecteurs de distances X et Y. La probabilité $p_{n_i o n_j d}$ devient alors:

$$p_{n_i^o n_j^d} = \int_R MVN(T^{od})\, d(T^{od}) \qquad (6.7)$$

où R est la région dans laquelle $t_{n_i^o n_j^d} \leq t_{n_p^o n_q^d}$, $\forall\ n_p^o, n_q^d$.

Deux méthodes ont été proposées pour évaluer l'intégrale "probit" (expression 6.7). Daganzo, Bouthelier et Sheffi (1977a et 1977b) proposent et testent une méthode approximative basée sur des formules de Clark (Clark, 1961). Ces formules permettent d'obtenir des approximations des quatre premiers moments de la distribution de Max $(u_1, u_2 \ldots u_n)$ quand le vecteur aléatoire $U = \{u_1, u_2 \ldots u_n\}$ a une distribution des probabilités conjointes normale multivariée (si $n \leq 3$ le calcul est exact). En ce qui concerne l'évaluation des paramètres de la fonction normale multivariée, Daganzo (1977) propose une méthode graphique.

Une deuxième méthode de résolution de l'intégrale (6.7) est la simulation. Ce type de méthodes a été utilisé en général dans des études de choix modal par Lerman et Manski (1976), Manski et Lerman (1978), Horowitz (1978), Ortúzar (1978), Kreibich (1979), Bonsall (1979), et Williams et Ortúzar (1979). Robertson (1977) et Robertson et Kennedy (1979) ont utilisé la même approche dans des études de choix de routes.

Evidemment la limitation principale de l'application de cette méthode à des problèmes de grande taille, comme celui qui nous occupe, est le coût informatique associé.

Dans notre problème du choix de routes en transport en commun, où l'accès au réseau se fait normalement à pied, l'hypothèse de l'existence d'une distance maximale de marche nous semble importante. Alors, des deux types de méthodes décrites, seules les méthodes de simulation sont applicables. Cependant nous pensons qu'une approche continue (population et activité distribuées uniformément à l'intérieur des zones) n'est pas nécessaire. D'abord, on sait que cette hypothèse n'est pas vraie, même s'il s'agit de petites zones. Deuxièmement, on peut se poser la question: pourquoi dépenser autant d'efforts et de ressources afin de dépasser le niveau de résolution de notre problème ? Il ne faut pas oublier que les flots origine-destination qu'on essaie de répartir entre chemins alternatifs sont le résultat, dans la plupart des cas, de la réponse d'un voyageur. Malgré tout, à notre avis, la diversion parait nécessaire parce qu'elle augmente les possibilités de mieux représenter la réalité. Dans ce contexte, une méthode plus simple et moins coûteuse comme celle que nous décrivons par la suite, nous semble adéquate.

Partition des zones en sous-zones

Comme première simplification, on approximera la surface d'une zone par un ensemble de petites sous-zones identiques, comme illustré dans la figure 6.21. La surface de ces zones étant raisonnablement petite (par exemple des carreaux de 100x100 mètres) on suppose que la population et l'activité de chaque zone sont uniformément réparties parmi les centroïdes des sous-zones qui la composent. Si n et m représentent le nombre de sous-zones de o et d respectivement, le

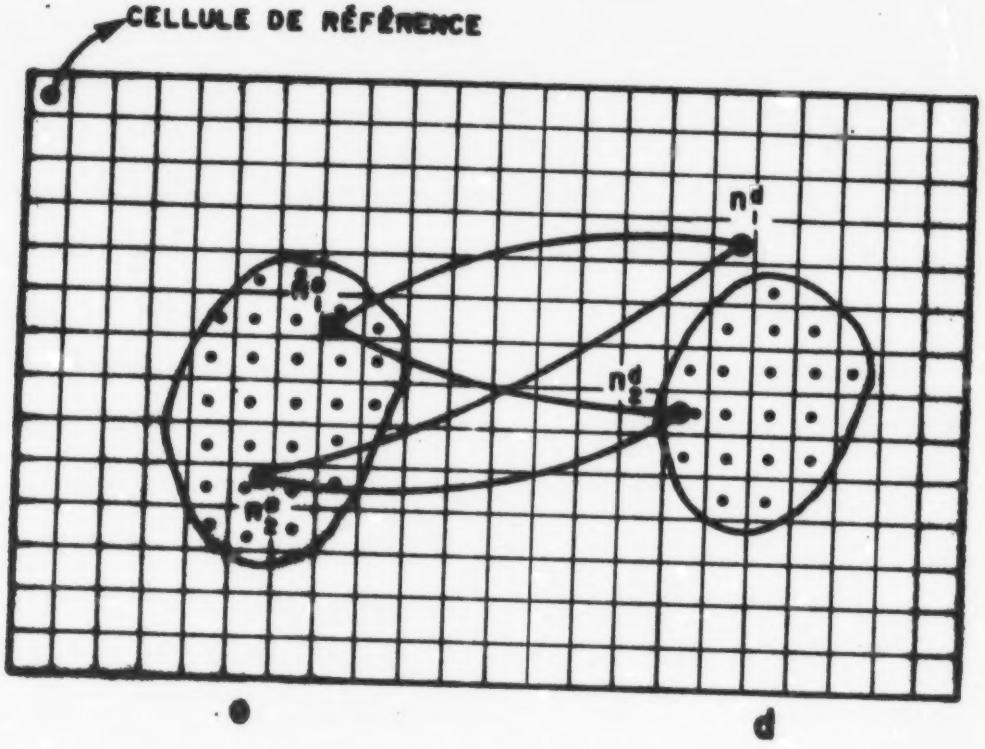


Figure 6.21 Zones divisées en sous-zones

calcul de la probabilité de chaque chemin alternatif implique l'examen des temps de chaque alternative pour les n x m combinaisons possibles entre les sous-zones de l'origine et de la destination. Le travail de codification manuelle additionnel pour l'implantation d'une telle méthode implique alors:

a) Division de la région d'étude en petites cellules carrées identiques, dont les coordonnées des centroïdes seront automatiquement calculées par rapport à celles d'une cellule de référence.

b) Pour chaque zone de la région d'étude on doit déterminer les cellules qui la forment.(Dans la figure 6.21, par exemple, les cellules indiquées avec un point).

Une fois cette information codifiée, il faut créer la représentation informatique de la composition des zones. Dans une liste NZONES, on retrouve à l'adresse k (k allant de 1 jusqu'au nombre total de cellules):

NZONES(k) : identification d'une cellule

Pour savoir à quelle zone est associée la cellule NZONES(k), on conserve dans un vecteur NCEL l'adresse de la première cellule de la zone NZ:

NCEL(NZ) = adresse sur la liste NZONES de la première cellule de la zone NZ.

Le calcul des probabilités $p_{n_i n_j}^{o\,d}$ se fera alors à l'aide de la liste NZONES, de NCEL, des coordonnées des noeuds et de la cellule de référence, en plus des temps des chemins sur le réseau, déjà calculés à l'étape précédente du modèle.

Si F représente le nombre de fois que le chemin $c_{n_i n_j}^{o\,d}$ est choisi (pour les déplacements entre paires de cellules origine-destination), la probabilité $p_{n_i n_j}^{o\,d}$, sera approximée par la formule:

$$p_{n_i n_j}^{o\,d} = \frac{F}{n \times m} \qquad (6.8)$$

A priori, deux problèmes peuvent se présenter lors de l'implantation du modèle dans une grande ville.

a) Effort considérable de codification: par exemple, une région de l'ordre de 40 km de long par 15 km de large serait divisée en 60.000 cellules de 100x100 mètres. Ayant codifié les frontières des zones, la définition des cellules associées à chaque zone peut se faire par informatique. Cependant, cette tâche est réalisable, même si elle devrait se faire manuellement. Une feuille transparente devrait être quadrillée et superposée à une carte contenant les zones de la région d'étude. Un codificateur devrait ensuite sélectionner les cellules élémentaires appartenant à chaque zone.

b) Mémoire d'ordinateur requise: pour une région comme celle de l'exemple précédent, la liste NZONES a une longueur maximale de 60.000 éléments. Etant donné que les coordonnées de chaque cellule sont calculées à partir des coordonnées de la cellule de référence et en fonction du système de numérotation des cellules élémentaires, seule la liste NZONES et le vecteur NCEL sont requis en mémoire. Si les identificateurs des cellules vont de -30.000 à +30.000 par exemple, dans un ordinateur IBM, le vecteur NZONES, défini comme une variable entière de deux "bytes" occuperait 120k de mémoire. En plus, cette information est utilisée seulement à l'étape de DIVERSION où très peu d'informations sont requises. Pour un problème ayant des dimensions similaires à l'exemple posé, la mémoire nécessaire n'excéderait pas 250k "bytes".

CHAPITRE VII

TESTS DES PROGRAMMES DEVELOPPES

7.1 Ressources informatiques requises

Le modèle d'affectation dont la structure a été décrite au chapitre précédent a été appliqué au cas de Montréal, afin de tester le fonctionnement de certains de ces modules et de prouver la faisabilité de son utilisation pour analyser des réseaux de grande taille. Comme nous l'avons déjà souligné, la région de notre étude comporte 1264 zones et le réseau analysé a 981 noeuds et 134 lignes de transport en commun. En ce qui concerne l'information sur la demande, quelques 17.400 déplacements origine-destination effectués sur le réseau de transport en commun, pendant la période de pointe du matin, font l'objet de ces tests.

Le modèle développé permet l'analyse de réseaux de transport en commun dont les dimensions maximales sont les suivantes:

- Nombre de zones: 1300
- Nombre de noeuds: 999
- Nombre de lignes: 150
- Longueur de la liste "noeuds le long des lignes" (pratiquement la moitié du nombre de liens de transport en commun) 2200
- Longueur de la liste "noeuds d'accès des zones" (nombre de liens d'accès) 5200

Le tableau 7.1 résume les besoins d'ordinateur (mémoire et temps) de calcul des différentes étapes du modèle d'affectation (1).

Le temps de calcul d'une simulation complète varie entre 57 min. et 72 min. de CPU sur l'ordinateur IBM 3031 de la C.T.C.U.M. Cette variation est due principalement aux deux dernières étapes du modèle (DIVERSION et CHARGE), le nombre d'itinéraires à charger dépendant de la valeur du paramètre de diversion utilisée dans la formule logit du modèle de diversion employé (premier modèle de diversion proposé dans le chapitre VI).

7.2 Quelques résultats

Même si nous n'analysons pas les résultats des simulations avec diversion parmi les chemins alternatifs entre chaque paire de zones origine-destination, nous présentons dans le tableau 7.2 les indicateurs globaux obtenus du chargement des itinéraires simulés pour cinq valeurs différentes du paramètre de diversion (WDIVER).

---

(1) La mémoire indiquée ne considère pas celle requise par le système où le modèle est implanté. L'ordinateur utilisé lors de ces tests est un IBM 3031.

Tableau 7.1 Besoins d'ordinateur (mémoire et temps de calcul) des différents modules du modèle d'affectation développé

Module	Mémoire (k bytes)	Temps C.P.U. (min)	
STRUCT ACCES EXPAN	240	4 - 5	(1)
CHEMIN	240	39	(2)
DIVERSION	1	9 - 12	(3)
CHARGE	240	5 - 16	(4)

(1) Le temps total de cette étape est de 4 min si le module d'accès simple (décrit au chapitre V, section 5.3) est utilisé. Il monte à 5 min lorsqu'on utilise le premier des deux modèles décrits au chapitre VI (population et activités des zones concentrées en leurs centroïdes).

(2) Ce temps est requis pour le calcul d'environ 78.800 itinéraires simulés, impliquant la détermination de 860 arbres de chemins les plus courts.

(3) Le temps varie suivant la valeur du paramètre de diversion utilisé dans la formule logit du premier modèle de diversion proposé.

(4) Le temps est proportionnel au nombre d'itinéraires chargés. Le chargement de 78.800 itinéraires demande 16 minutes de C.P.U.

Tableau 7.2 Indicateurs globaux du comportement du réseau

(Chargement avec diversion)

	# Itinéraires chargés	Sections/Dépl.	Pass. métro	Sections métro	Correspondances métro-métro	Sections autobus
Itinéraires décrits	17 442	1.917 (100)	160 857 (100)	211 402 (100)	50 545 (100)	419 013 (100)
Itinéraires simulés (WDIVER = 0.0) (1)	78 815	2.630 (137)	177 964 (111)	226 144 (107)	48 180 (95)	641 966 (153)
Itinéraires simulés (WDIVER = -0.2)	61 213	2.370 (124)	178 592 (111)	228 055 (108)	49 463 (98)	550 482 (131)
Itinéraires simulés (WDIVER = -0.5)	39 388	2.290 (119)	180 010 (112)	230 733 (109)	50 723 (100)	521 150 (124)
Itinéraires simulés (WDIVER = -0.8)	31 462	2.280 (119)	180 225 (112)	231 421 (109)	51 196 (101)	518 019 (124)
Itinéraires simulés (WDIVER = -1.5)	25 088	2.270 (118)	180 320 (112)	232 084 (111)	51 764 (102)	514 042 (123)

(1) WDIVER = paramètre de diversion de la formule logit.

L'impédance I_k , mesurée en minutes, d'un chemin quelconque k est:

$$I_k = 5 * q + ta_o + ta_d + \sum_{j=1}^{q} (tv_j + i_j) \qquad (7.1)$$

où:

q = nombre de lignes empruntées

tv_j = temps de voyage à bord d'un véhicule pour la ligne j (min)

i_j = intervalle de la ligne j (min)

ta_o, ta_d = temps d'accès à l'origine et à la destination (min)

Si ℓ est le nombre de chemins alternatifs entre deux zones, I_k l'impédance du chemin k, et WDIVER le facteur de diversion, la probabilité p_k de l'alternative k a été calculée comme:

$$p_k = \frac{\exp (WDIVER * I_k)}{\sum_{m=1}^{\ell} \exp (WDIVER * I_m)} \qquad (7.2)$$

Evidemment, lorsque WDIVER est égal à zéro, le flot entre deux zones se répartit, également, entre tous les chemins possibles (tous les chemins d'impédance minimale entre les noeuds d'accès de la zone d'origine et les noeuds d'accès de la zone de destination). A mesure que la valeur absolue de WDIVER croît, de moins en moins de chemins alternatifs sont chargés. Pour des valeurs d'environ -10.0 du paramètre WDIVER, il n'y a presque pas de diversion et le modèle testé équivaut à un modèle d'affectation tout ou rien entre centroïdes.

Une partie importante (de l'ordre de 75%) des déplacements

décrits entre zones étant des itinéraires simples (une seule personne se déplace entre deux zones données) il résulte normalement qu'un modèle avec diversion ne donne pas de bons résultats lorsqu'on les compare avec les indicateurs globaux obtenus du chargement des itinéraires décrits. Il faut se rappeler, cependant, qu'une réponse de l'enquête une fois expansionnée représente plusieurs (18.86 dans notre cas) déplacements réels, qui n'utilisent pas nécessairement le même itinéraire de la réponse. L'avantage alors d'un modèle avec diversion est qu'il est plus probable (même si avec les données normalement disponibles on ne peut pas le prouver) qu'il donne une meilleure reproduction de la réalité (non pas des itinéraires décrits), qu'un modèle tout ou rien entre zones.

CHAPITRE VIII

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

8.1 Les principaux résultats des analyses de comparaison d'itinéraires

La méthode de comparaison d'itinéraires décrits et simulés développée dans ce travail, et appliquée au cas de Montréal s'avère très intéressante. D'une part, elle permet la calibration du modèle d'affectation utilisé lors de la simulation d'itinéraires (affectation tout ou rien aux chemins d'impédance minimale) et, d'autre part, elle sert à tester si les hypothèses sous-jacentes à ce modèle sont adéquates. Les principaux résultats de nos analyses empiriques peuvent se résumer comme suit:

a) Les usagers du transport en commun à Montréal, pendant la période de pointe du matin, face à un ensemble de chemins alternatifs pour atteindre leurs destinations, empruntent en général celui d'impédance minimale. Les analyses de comparaison de type 1 nous ont permis de reproduire environ 88% des 17.442 itinéraires analysés, avec une fonction d'impédance (mesurée en minutes) comme celle de l'expression 8.1 (tv_j et i_j étant respectivement le temps de voyage en véhicule et l'intervalle pour la ligne j et q le nombre de lignes empruntées dans l'itinéraire simulé).

$$I = 5.q + \sum_{j=1}^{q} (tv_j + i_j) \qquad (8.1)$$

b) La présence d'une pénalité de 5 minutes, associée à l'emprunt d'une ligne, dans la fonction d'impédance est très importante. Les analyses effectuées montrent que lorsqu'elle n'est pas considérée, le modèle surestime le nombre de correspondances et surtout la demande de lignes plus rapides et à faible intervalle. Cette remarque est importante puisqu'on sait que les modèles d'affectation sont utilisés dans l'évaluation de projets d'investissement en transport urbain, impliquant souvent la création de lignes de métro ou l'extension des lignes déjà existantes.

c) Lorsque les liens d'accès entre les centroïdes des zones et les noeuds du réseau interviennent dans le calcul de chemins d'impédance minimale (analyses de comparaison de type 2 et 3) le taux de reproduction des itinéraires décrits décroît sensiblement. En effet le pourcentage de paires d'itinéraires différentes atteint 73,35% pour les analyses de type 2 et 60.38% pour les analyses de type 3.

d) L'analyse ayant comme but d'expliquer les variations du comportement des usagers face au choix d'itinéraires, montre que des variables telles que le sexe et l'âge des voyageurs et le motif des déplacements ne sont pas significatives. Cependant la variable "nombre de sections empruntées dans l'itinéraire décrit" est très importante. Le pourcentage de paires d'itinéraires différentes croît linéairement avec le nombre de correspondances de l'itinéraire décrit.

8.2 Les conclusions les plus importantes

a) La comparaison des résultats des analyses de type 2 et 3 avec ceux de l'analyse de type 1 permettent de conclure que les erreurs du modèle d'affectation tout ou rien dues aux problèmes d'agrégation spatiale et d'accès sont nettement plus importantes que celles dues aux hypothèses concernant le comportement des voyageurs face au choix d'itinéraires. Evidemment, les méthodes d'accès utilisées lors de nos expériences apparaissent sensiblement arbitraires. Cependant, comme on l'a déjà souligné, ils ne sont ni plus ni moins arbitraires que les autres méthodes normalement employées (par exemple, la détermination manuelle de liens d'accès dont la longueur correspond à la distance moyenne d'accès de la zone).

Cette conclusion est en désaccord avec d'autres opinions qui ont signifié le rejet presque général des modèles d'affectation du type tout ou rien. Malgré cela nos résultats ne sont pas étonnants si l'on considère les arguments suivants:

i) La plupart des voyages réalisés pendant les heures de pointe (période de nos analyses), correspondent à des déplacements habituels (motif travail, étude). Même si les usagers du transport en commun ne connaissent pas nécessairement le réseau complet, il semble raisonnable de supposer qu'au moins ils ont une connaissance suffisante des alternatives auxquelles ils font face lors de ces déplacements habituels.

ii) En ce qui concerne la perception du temps de voyage, même si l'on accepte qu'en général les usagers ne sont pas capables de percevoir le temps de chaque alternative d'une façon exacte, il semble que la plupart d'entre eux peuvent le faire avec un degré d'approximation suffisant pour pouvoir choisir correctement leur meilleur itinéraire.

iii) Il est évident que les usagers ne perçoivent pas de la même façon les différents attributs de la fonction d'impédance. Mais cela n'est pas une raison suffisante pour rejeter l'utilisation d'une fonction identique (les mêmes paramètres) pour tous les voyageurs. Il faut savoir si les variations de ces perceptions sont d'une importance telle qu'elles pourraient faire varier les choix des voyageurs faisant face au même ensemble d'alternatives. D'après nos résultats cette variation ne devrait pas être très importante.

iv) En ce qui touche le nombre d'alternatives disponibles, il faut souligner qu'en pratique, dans la plupart des cas, les usagers du transport en commun font face à un nombre assez restreint d'itinéraires. Les déplacements sur des artères desservies par plusieurs lignes parallèles constituent une exception. Cependant, ce problème de choix est résolu complètement avec l'utilisation d'un algorithme

d'affectation tout ou rien avec diversion entre les lignes communes.

v) Une autre remarque contre l'affectation tout ou rien concerne le problème de la "restriction de la capacité". En effet on dit que même si toutes les hypothèses de ces modèles étaient correctes, les voyageurs ne pourraient pas emprunter toujours les chemins les plus courts, à cause des limites de capacité, et ils devraient se répartir entre plusieurs "bonnes routes". A cet énoncé on doit répondre que dans des réseaux non congestionnés (comme celui de Montréal), il peut y avoir occasionnellement des problèmes de capacité. Cependant sur les routes de plus grand achalandage, exploitées jusqu'à la limite de leur capacité, en général, l'opérateur répond rapidement en augmentant l'offre. Dans les réseaux congestionnés, par contre, presque toutes les routes sont exploitées, pendant les périodes de pointe, à la limite (et en plusieurs cas au-delà) de leur capacité. Les problèmes de capacité ne devraient pas être alors une cause importante de la diversion dans les réseaux de transport en commun.

b) Etant donné le comportement des usagers face au choix d'itinéraires, tant les modèles du type tout ou rien (appliqués entre centroïdes de zones) que les modèles du type probabiliste multichemin (comme celui de Dial) pourraient être considérés tous les deux comme

arbitraires. C'est soit, pour les premiers, à cause surtout des erreurs introduites par les problèmes de l'agrégation spatiale, ou soit, pour les deuxièmes, à cause du fait que, en plus du problème relatif à l'existence d'alternatives correlées, une diversion entre des paires de noeuds est produite en même temps qu'une diversion entre paire de zones.

c) Les modèles d'affectation de réseaux de transport en commun qui semblent les plus adéquats sont ceux qui chargent le flot entre deux zones parmi plusieurs chemins alternatifs tout en respectant le fait qu'entre deux noeuds du réseau, seul le chemin d'impédance minimale est utilisé (modèles du type "Accès-Diversion").

d) Finalement, il faut souligner un aspect important concernant le niveau de résolution du problème d'affectation. Il est clair qu'un bon modèle du type Accès-Diversion reproduira probablement mieux la réalité. Cependant il se peut que ces résultats, comparés aux résultats du chargement des itinéraires décrits, ne soient pas meilleurs que ceux qu'on obtiendrait à l'aide d'un modèle d'affectation de type tout ou rien, appliqué entre les centroïdes des zones. La raison de cette incohérence apparente avec les conclusions précédentes s'explique ainsi: les éléments d'une matrice (expansionnée) de déplacements origine-destination entre zones obtenus par enquête correspondent dans la plupart des cas (environ 75% pour nos données) à la réponse validée d'un individu. Cela pose un problème à l'analyste: est-ce que la réponse d'un modèle doit dépasser le niveau de résolution des données

disponibles ? Est-ce que le but ultime d'un modèle est la reproduction d'une réalité inconnue ?

Si la réponse à ces question est oui, les modèles multichemin (principalement ceux de type accès-diversion) seraient les plus adéquats. Par contre, si la réponse est non, un modèle tout ou rien entre centroïdes, malgré toutes ses limitations, serait plus juste.

8.3 Recommandations: l'importance des études empiriques

Depuis les études de Chicago et Détroit, au milieu de la décennie 50, le modèle de transport (procédure séquentielle classique d'estimation de demande) a connu jusqu'à nos jours de nombreux développements méthodologiques. Toutes ces étapes (génération, distribution, répartition modale et affectation) ont été l'objet d'une quantité appréciable de recherches qui, dans plusieurs cas, ont donné lieu à de nouveaux modèles presque toujours plus complexes et théoriquement plus puissants. Cet effort de presque trente ans a produit de grands fruits. Sans doute, on connaît aujourd'hui beaucoup plus sur les habitudes de voyage des gens que ce qu'on connaissait auparavant. Ce qui nous étonne, cependant, est le fait que malgré cette évolution constante du modèle de transport et son application croissante, sous différentes formes, lors d'innombrables études réalisées partout dans le monde, très peu d'études empiriques visant à déterminer tant la pertinence de ses principales hypothèses que ses capacités prédictives aient été faites. La discussion et la recherche des causes possibles de ce manque d'intérêt à l'égard des études à caractère expérimental ne nous

concerne pas. Cependant, étant conscients de ce problème et encouragés par les résultats de nos analyses, qui ne sont pas nécessairement cohérents avec les hypothèses raisonnables normalement acceptées, nous voulons souligner l'importance de ce type de travaux.

Suivant la même ligne des analyses que nous avons amorcées, plusieurs recherches devraient être entreprises. Nous citons, à titre d'exemple, l'étude du comportement de groupes spécifiques d'usagers (ceux qui utilisent la voiture privée et le transport en commun lors de leurs déplacements, usagers du métro, etc). Il serait intéressant aussi d'étudier le comportement des voyageurs pour des périodes hors pointe.

A notre avis, d'ailleurs amplement partagé, il nous apparaît que de nombreuses autres expériences devraient être entreprises sur la validation et la vérification d'hypothèses des modèles de transport par la seule exploitation systématique de l'importante banque de données accumulées par la C.T.C.U.M. depuis 1970 (parmi celles-là, on doit noter les enquêtes O-D de 1970, 1974, 1978 et très bientôt celle de 1982).

En somme, nous pourrons terminer en exprimant une idée qui a été implicite tout le long de cette section. Une connaissance quantifiée des limitations des hypothèses du modèle de transport et de ses capacités prédictives est nécessaire avant d'entreprendre de nouveaux développements théoriques.

REFERENCES

Achim, C., Chapleau, R., Chriqui, C., Florian, M. (1976) "Transit Route Development and Evaluation Techniques: A Survey of the State of the Art". Publication no. 47, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Achim, C., Chapleau, R. (1976) "EMME-Coding the Transit Network". Publication no. 49, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Achim, C. (1979) "EMME User's Guide". Publication no. 129, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Achim, C., Florian, M. (1979) "EMME: A Computer System for Urban Transportation Planners". Publication no. 127, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Baass, K.G. (1979) "A Procedure to Determine a Good Zonal System in the Transportation Planning Process". Thèse de Doctorat, Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Ontario.

Baxter, R.S. (1976) "Computer and Statistical Techniques for Planners". Menthuen and Co., London (Angleterre).

Bélanger, S. (1980) "Description de la Procédure de Validation d'Itinéraires". Notes non-Publiées, Centre de l'Informatique C.T.C.U.M., Montréal.

Bonsall, P.W. (1979) "Microsimulation of Mode Choice - a Model of Organised Car Sharing". P.T.R.C. Summer Annual Meeting, University of Warwick (Angleterre).

Burrel, J.E. (1976) "Multipath Route Assignment: A Comparison of Two Methods", Traffic Equilibrium Methods, Lecture notes in Economics and Mathematical Systems, Volume 118, Springer-Verlag, New York.

Chapleau, R. (1974) "Réseaux de Transports en Commun: Structure Informatique et Affectation". Publication no. 13, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Chapleau, R., Trottier, P. (1979) "L'utilisation du Modèle d'Affectation Transcom dans la Planification Opérationnelle d'un Réseau de Transport en Commun". Route et Transports, Août (1979), 23-31.

Clark, C. (1961) "The Greatest of a Finite Set of Random Variables". Operations Research, Vol. 9, 145-162.

Chriqui, C. (1974) "Réseaux de Transports en Commun: les Problèmes de Cheminement et d'accès". Publication no. 11, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Chriqui, C. (1975) "Public Network Assignment Method". Rapport de Recherche 75-08, Ecole des Hautes Etudes Commerciales, Université de Montréal.

Cochrane, R.A. (1975) "A Possible Economic Basis for the Gravity Model". Journal of Transport Economics and Policy 9, 34-49.

Cody, R.B. et al (1976) "Interactive Programming System for Transportation Planning". Transportation Research Record no. 574, 23-34.

Daganzo, C.F. (1977) "Network Representation, Continuum Aproximations and a Solution to the Spatial Aggregation Problem of Traffic Assignment". Working Paper no. 7702, Institute of Transport Studies, University of California, Berkeley, California.

Daganzo, C.F., Bouthelier, F., Sheffi, Y. (1977a) "Multinomial Probit and Qualitative Choice: A Computationally Efficient Algorithm". Transportation Science, Vol. 11, no. 4, 338-358.

Daganzo, C.F., Bouthelier, F., Sheffi, Y. (1977b) "An Efficient Approach to Estimate and Predict with Multinomial Probit Models". Document présenté au Congrès du T.R.B. (1977).

Daganzo, C.F., Sheffi, Y. (1977) "On Stochastic Models of Traffic Assignment", Transportation Science, Vol. 11, no. 3, 253-274.

Daly, A.J. (1973) "Transept - A Multipath Public Transport Assignment Model", P.T.R.C. Seminar Proceedings.

Daly, A.J., Rogers, K.B. (1973) "Better Bus Services". L.G.O.R.U. Royal Institute of Public Administration, London (Angleterre).

Daly, A.J. et al (1973) "Planning Urban Bus Routes". L.G.O.R.U. Royal Institute of Public Administration, Report C-149, London (Angleterre).

De Cea, J., Chapleau, R., Trottier, P. (1982) "Calibration des Coefficients d'Impédance et Etude du Comportatement des voyageurs par l'Analyse désagrégée de leurs Itinéraires sur le Réseau de Transport en Commun". Rapport de Recherche, Service de la Planification C.T.C.U.M., Montréal.

Dial, R.B. (1967) "Transit Pathfinder Algorithm". Highway Research Record no. 205, 67-85.

Dial, R.B., Bunyan, R.E. (1968) "Public Transit Planning System". Socio-Econ. Plan. Sci., Vol. 1, 345-362.

Dial, R.B. (1971) "A Multipath Traffic Assignment Model". Highway Research Record no. 369, 199-210.

Dial, R.B. (1976) "Urban Transportation Planning System: Philosophy and Function". Transportation Research Record No. 599, 60-64.

Dial, R.B., Rutherford, G.S., Quilli an, L. (1979) "Transit Network Analysis: INET". Rapport U.M.T.A.-U.P.M.-20-79-3, U.S. Department of Transportation.

Domencich, T., Mc Fadden, D. (1975) "Urban Travel Demand: A Behavioral Approach". North Holland, Amsterdam, The Netherlands.

Fisk, C. (1979) "Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment". Publication no. 120, Centre de Recherche des Transports, Université de Montréal.

Florian, M., Fox, B. (1976) "On the Probabilistic Origin of Dial's Multipath Traffic Assignment Model". Transportation Research, Vol. 10, no. 5, 339-341.

Florian, M. (1976) "A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes". Publication no. 32, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Florian et al (1977) "EMME: A Planning Method for Multi-Modal Urban Transportation Systems". Publication no. 62, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Florian et al (1979 a) "Validation and Application of an Equilibrium Based Two-Mode Urban Transportation Planning Method". Transportation Research Record no. 728, 14-22.

Florian et al (1979 b) "EMME Summary Report". Publication no. 101 Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Gaudry, M., Dagenais, M. (1979) "The Dogit Model", Transportation Research, Vol. 13B, no. 2, 105-112.

Horowitz, J. (1978) "The Accuracy of the Multinomial Logit as an Approximation of the Multinomial Probit Model of Travel Demand". Unpublished Manuscript, J.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.

Kreibich, V. (1979) "Modelling Car Availability, Modal Split and Trip Distribution by Monte-Carlo Simulation: A Short Way to integratéd Models". Transportation, 8, 53-66.

Khelifi, D., Uhry, J.P. (1978) "Terese (TEsts de RESEaux): Modèles de Transport Collectif Urbain". R.R. no. 125, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Last, A., Leak, S.E. (1976) "Transept: A bus Model". Traffic Engineering and Control, 14-20.

Lerman, S.R., Manski, C.F. (1976) "An Estimation of the Generalized Multinomial Probit Choice Model". Rapport présenté au Congrès du T.R.B. (1977).

Manski, C.F., Lerman, S.R. (1978) "On the Use of Simulated Frequencies to Approximate Choice Probabilities". Cambridge Systematics Inc.

Newell, G.F. (1980) "Traffic Flow on Transportation Networks". M.I.T. Press, Cambridge, Massachussetts.

Nguyen, S., James, L. (1975) "TRAFFIC - An Equilibrium Traffic Assignment Program". Publication no. 7, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Noguchi, T., Schneider, J.B. (1977) "Data Display Techniques for Transportation Analysis and Planning: An investigation of Three Computer-Produced Graphics". Transportation Planning and Technology, Vol. 4.

Ortúzar, J.D. (1978) "Mixed Mode Demand Forecasting: An Assesment of Current Practice". P.T.R.C. Summer Annual Meeting, University of Warwick (Angleterre).

Ortúzar, J.D. (1980) "Modal Choice Modelling with Correlated Alternatives". Thèse de Doctorat, Institute for Transport Studies, Université of Leeds, Leeds (Angleterre).

Orchard, A.J., Sinfield, A.C., Warren, D.M. (1972 a) "Transitnet 1970 Network Specification and Calibration". Research Memorandum no. 368, Greater London Council.

Orchard, A.J., Sinfield, A.C., Warren, D.M. (1972 b) "Final Calibration of the Transitnet Public Transport Trip Assignment Model on a 1962 Network". Research Memorandum no. 330, Greater London Council.

Peat, Marwick, Mitchel and Co. (1973) " A Review of Operational Urban Transportation Planning Models". NTIS PB-222-109.

Rapp, M.H. (1972 a) "Transit System Planning: A Man-Computer Interactive Graphic Approach". Highway Research Record no. 415, 49-61.

Rapp, M.H. (1972 b) "Planning Demand-Adoptive Urban Public Transportation Systems: The Man Computer Interactive Graphic Approach". University of Washington, Seattle, Wash., NTIS PB 202-412.

Rapp, M.H. (1972 c) "Man-Machine Interactive Transit System Planning". Socio-Econ. Plan. Sci.,Vol. 6, 95-123.

Rapp, M.H. et al (1974) "Ehituc: Modèle Interactif Graphique pour la Recherche Heuristique d'Itinéraires de Transports Urbains Collectifs". Institut de Technique des Transports ITEP/IPF-L Lausanne, Suisse.

Rapp, M.H. et al (1976) "Interactive Graphic System for Transit Route Optimisation". Transportation Research Record, no. 559, 73-88.

Rapp, M.H., Mattenberger, Ph. (1977) "Planification Opérationnelle des Transports Urbains en Commun: Approches et Applications". Document présenté à la Conférence Mondiale sur la Recherche dans les Transports, Rotterdam, Pays-Bas.

Rieple, R.J., Gehner, C.D. (1978) "Interactive Graphics in Europe: Three Computer-Aided Transportation Planning Tools". Computer Graphics, Vol. 1, no. 13, 18-25.

Robertson, D.I. (1977) "A Deterministic Method of Assigning Traffic to Multiple Routes of Known Costs". T.R.R.L. Report LR 757, Crowthorne, (Angleterre).

Robertson, D.I., Kennedy, J.V. (1979) "The Choice of Route, Origin and Destination by Calculation and Simulation". T.R.R.L. Report LR 877, Crowthorne, (Angleterre).

Schneider, J.B. (1973) "Interactive Graphics in Transportation Systems Planning and Design". Seminar of the Battelle-Seattle Research Center, Seattle, Wash.

Schneider, J.B., Gehner, C.D. (1973) "The Interactive Graphic Transit Design System: A Brief non-technical Overview of its Structure and Operation". The Logistics and Transportation Review, Vol. 10, no. 1, 41-53.

Schneider, J.B., Gehner, C.D. et al (1974) "Computer-Aided Design of Urban Transit Systems". Transportation Engineering Journal, 943-958, Novembre 1974.

Schneider, J.B., Porter, D. (1974) "Assessing the Utility of an Interactive Graphic Computing System: A Transportation Systems Design Problem". Transportation Research Record no. 491, 69-79.

Schneider, M. (1973) "Probability Maximisation in Networks". Proceedings of the International Conference on Transportation Research, Bruges, Belgique, 748-755.

Sheffi, Y. (1978) "Transportation Network Equilibrium with Discrete Choice Models". Thèse de Doctorat, Department of Civil Engineering, M.I.T. Cabridge, Massachussets.

U.M.T.A. (1972) "UMTA Transportation Planning System, Network Development Manual". NTIS, PB 212-930.

U.S. Department of Transportation (1978) "Overview of the ITAM and IGTDS Packages".

Williams,H.C.W.L., Ortúzar, J.D. (1979) "Behavioural Travel Theories Model Specifications and the Response Error Problem". PTRC Summer Annual Meeting, University of Warwick (Angleterre).